técnica

349

associação dos estudantes do instituto superior técnico

junho 1965

revista de engenharia

CIMENTO SECIL

Fábrica:

Outão — Setúbal

Telef. 228824/5

Escritório:

R. do Comércio, 56-3.º

LISBOA 2

Telef. 328201/2/3

CORRENTES

DE TRANSMISSÃO

PARA

INDÚSTRIA, AGRICULTURA, ETC.

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS

AUTO-LUSITANIA

ALFREDO DUARTE, LDA.

AVENIDA DA LIBERDADE, 73-79

LISBOA

confiança para a construção com

materiais novobra

EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

pavimentos

coberturas

vigas de grande vão

asnas

perfis

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS, NOVOBRA, LDA.

AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100, 5.º D. - TEL. 77 48 52/766446 - LISBOA-5

gepoc

GABINETE DE ESTUDOS, PROJECTOS E ORÇAMENTOS PARA A CONSTRUÇÃO

Encarrega-se de projectos de:

- Estruturas em Betão Pré-esforçado
- Estruturas Metálicas
- Edifícios Industriais
- Edifícios de Habitação e Escritórios
- Condutas, Reservatórios e Silos
- Pontes
- Recalçamento de Prédios
- Entivações e Cofragens Especiais
- Préfabricação

AV. ELIAS GARCIA, 162 - 1.º ESQ.

LISBOA • TEL. 77 10 53

técnica

Redacção e Administração: AVENIDA ROVISCO PAIS, I.S.T. * TELEF. 77 54 49 * LISBOA-1

— DIRECTOR
J. F. GOMES DE PINA

— ADMINISTRADOR
ASSIS F. MARTINS

— SECRETARIO
J. M. COSTA MONTEIRO

— REDACTORES
HELENA ALVES
BARBOSA COLEN
GIRÃO PINA

EDITOR E PROPRIETÁRIO
ASS. DOS EST. DO IST

PUBLICAÇÃO PERIÓDICA MENSAL

ANO XL N.º 349
JUNHO DE 1965

ASSINATURAS:

	3 N.os	6 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	37$50	60$00	110$00
Ultramar Português e Espanha	—	65$00	120$00
Estrangeiro	—	70$00	130$00

NUMERO AVULSO 15$00

COMPOSTO E IMPRESSO
NA
Tip. JORGE FERNANDES, L.DA
RUA CRUZ DOS POIAIS, 103
LISBOA

SUMÁRIO

CAPA — Série de 10 Transformadores EFACEC Shell-Type, monofásico, de 29000 kVA - - 242 000/$\sqrt{3}$ V, fornecidos à Hidro-Eléctrica do Douro para a Central da Bemposta.

Págs.

Pozolanas de alta reactividade inicial — I
A reactivação da Pozolana natural
Por A. de Sousa Coutinho 547

Distribuição da contaminação do estuário do Tejo
Por Pedro Celestino da Costa 571

Notas informativas — **Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional** 584

Exemplo de corantes *azo* e sua aplicação à coloração de diversas fibras
Por J. E. Pinto Ferreira e J. Gamboa Figueira. . 585

Do Mundo Técnico 593

Biblioteca 599

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DA EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

Índice Alfabético dos nossos anunciantes

A — Pág.

Aguiar & Melo, Lda. XXXIII
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd. . . XXXII
Asea Eléctrica Ld.ª XVI
Auto-Lusitânia . . . . . 2.ª da capa

B

Berliet XXIV

C

CIDEX IV
CIDLA XXVIII
Cimento Secil . . . . . 2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos . . VIII
Companhia Portuguesa de Fornos Eléctricos XXXIII
Companhia Portuguesa de Trefilaria XXVI
Companhia União Fabril XIV
C. Santos, Ltd.ª . . . . . VI e VII
Construções Técnicas XXVII

E

Electrotécnicos Reunidos XXV
Electro-Arco, Ltd.ª VI
Empresa de Cimentos de Leiria . . XXXVI
Empresa Electro Cerâmica XXXI
Empresa de Produtos Asfálticos. . . X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Ltd.ª . . . . . 3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações XX

F

Fábrica Portugal II
Fanafel XVI
Fassio, Ld.ª XX
Fundações Franki, Lda. I

G

George Fischer IX
GEPOC . . . . . 2.ª da capa
Guedes & Almeida, Lda. XXXV

H

Harker Sumner & C.ª, Ltd. XXXVI

I — Pág.

Impermeábilis XXVI
Instrom XXXIX
I. S. T. XL
Isola XXIX
Isolux, Lda. XXXVIII

J

Jayme da Costa, Lda XIX
Johann Keller XL

M

MAGUE XIII
Monteiro Gomes, Lda. XXX
Monterroso & C.ª, Lda. XXXVIII

N

Novobra, Lda. . . . . 2.ª da capa

P

Patrick Thompson, Lda. XL
Pimentel & Casquilho, Ltd.ª III

Q

Quimicor, S.A.R.L. XXIII

R

Renoluz XXVI

S

SMEIA XV
Sociedade de Electricidade Brown Boveri . . . . . 4.ª da capa
Soc. Michaelis de Vasconcelos . . . XII
Sociedade Industrial Metalúrgica . XXXI
Sociedade Portuguesa Cavan . . . VIII
Sociedade Portuguesa de Válvulas XVIII
Sondagens e Fundações A. Cavaco . IV
Sondagens Ródio, Ltd.ª XXXI
Sotécnica XL
Standard Eléctrica VII
S. T. E. T. XXI

V

Vasco Pessoa, Lda. XXVI

W

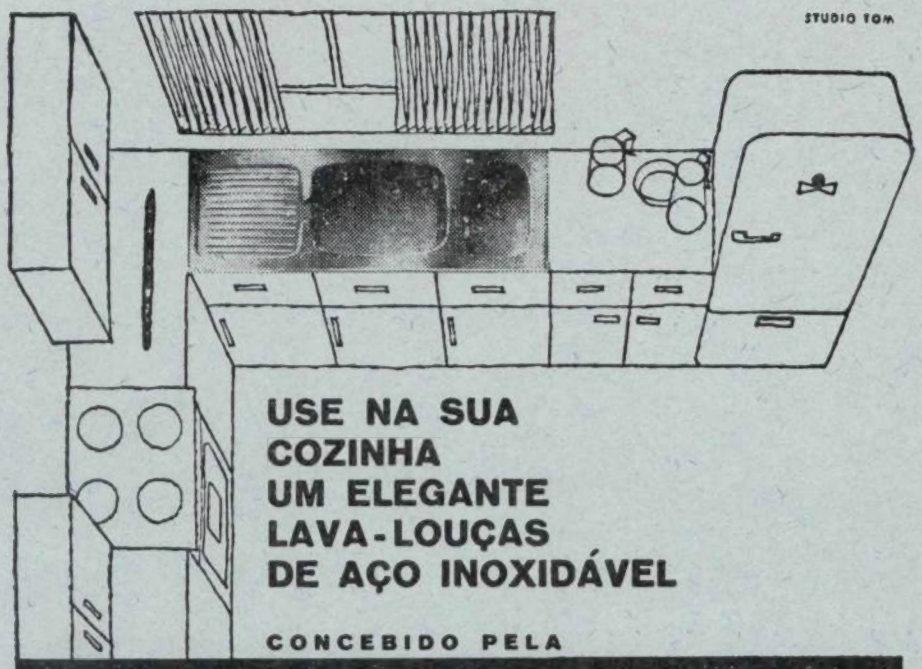
Wild Portugal, Lda. XVII

Oficinas VOLVO da Auto Sueca, Lda.
PORTO

Assente sobre
96 estacas Franki

FUNDAÇÕES FRANKI, L.DA

Rua Braamcamp n.° 13-3.° — Lisboa — Telef. P.P.C. 73 4112 — End. Teleg. FRANKI

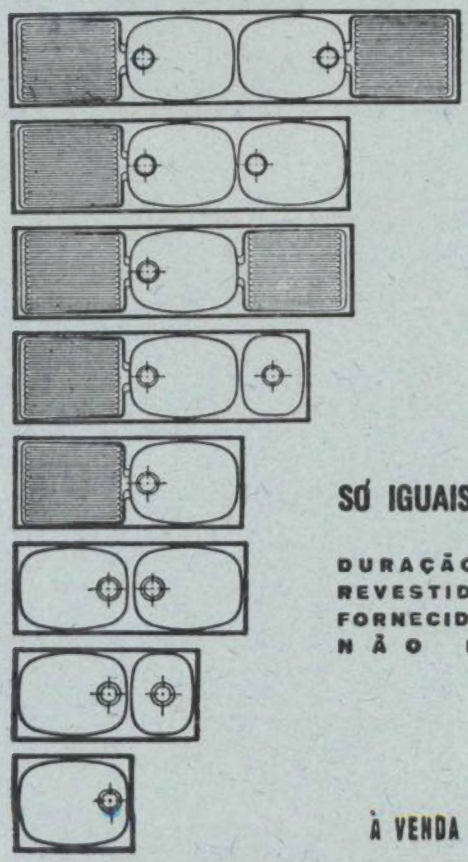


USE NA SUA COZINHA UM ELEGANTE LAVA-LOUÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL

CONCEBIDO PELA

FABRICA PORTUGAL

PARA MODERNIZAR OS LARES DE PORTUGAL



APRESENTADOS EM

8 MODELOS

"STANDARD"

EXECUTAM-SE FORA DE SÉRIE, MODELOS ESPECIAIS PARA GRANDES INSTALAÇÕES

SÓ IGUAIS AOS MELHORES ESTRANGEIROS

DURAÇÃO ILIMITADA · HIGIÉNICOS
REVESTIDOS DE ISOLAMENTO ESPECIAL
FORNECIDOS COM SIFÃO DE SEGURANÇA
NÃO PARTEM A LOUÇA

À VENDA NAS BOAS CASAS DA ESPECIALIDADE

PIMENTEL & CASQUILHO, L.DA

QUASE 40 ANOS AO SERVIÇO DA ENGENHARIA PORTUGUESA

GRANDE SORTIDO DE INSTRUMENTOS DE PRECISÃO, CIENTÍFICOS E INDUSTRIAIS

RUA JARDIM DO REGEDOR, 24, 2.°
LISBOA
TELEF.: 32 43 14 — 32 42 48 ✦ TELEG.: TECNA

Bombas centrífugas «PACIFIC»

Construídas por

Batignolles - Chatillon

Especialmente destinadas para:

— Petróleos
— Indústrias químicas
— Construções navais
— Centrais eléctricas
— Alimentação de caldeiras
— Etc., etc.

Sob as condições de funcionamento seguintes:

— Débitos: 1 m³/h a 10.000 m³/h
— Pressões: altas e baixas
— Temperaturas: −180° C + 500° C
— Líquidos: corrosivos ou não

Para estudos e orçamentos, consultar o representante em Portugal:

CIDEX — Comércio Internacional
e Representações Industriais, Lda.

Av. Casal Ribeiro, 46-2.°/Telef. 73 53 07/LISBOA 1

Pesquisas e captações de água

Sondagens

Rebaixamento de níveis aquíferos

Injecções e consolidações de terrenos

Fundações

Estacas de betão

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA-1
— TELEF. 73 35 45 - 5 95 62 - 55 36 73

ELECTRO-ARCO
LIMITADA

●

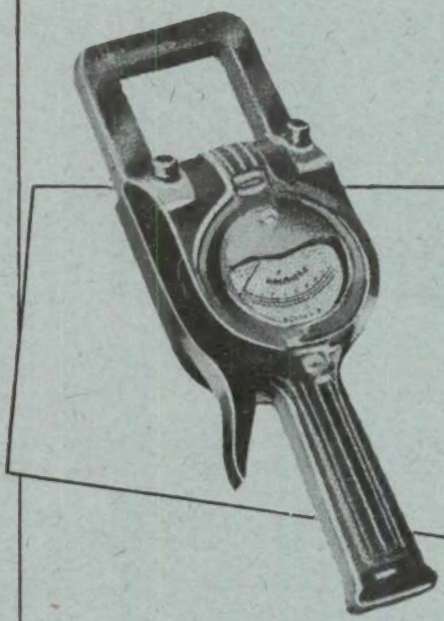
ELECTRODIOS
POSTOS E ACESSORIOS
PARA A SOLDADURA ELECTRICA

●

MATERIAL APROVADO PELO
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
VENDA NOVA — AMADORA
LISBOA
RUA SILVA CARVALHO, 239 — TEL 683649
PORTO
RUA DO BOLHÃO, 216 — TEL 21277

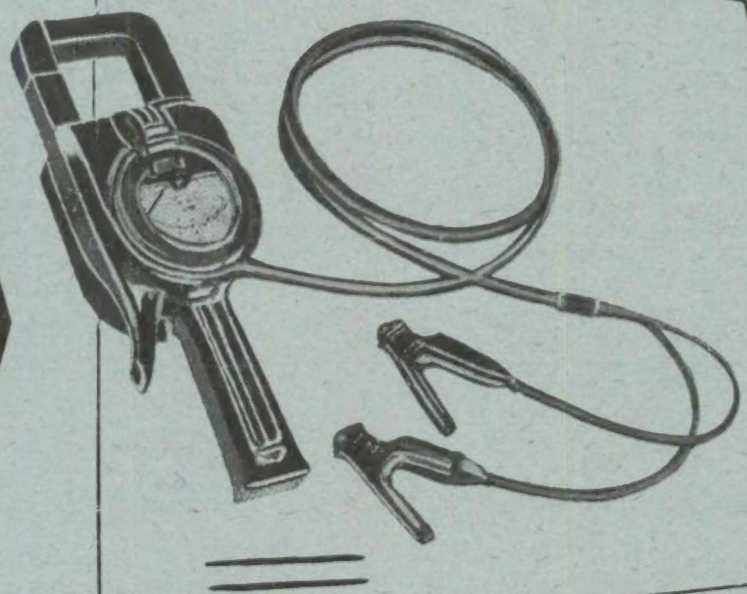
PINÇAS FERRANTI



PINÇAS VOLT — AMPERIMÉTRICAS

7 ESCALAS

EM AMPÈRES	EM VOLTS
0 – 10 AMPS.	0 – 150 V
0 – 25 »	0 – 600 »
0 – 100 »	
0 – 250 »	
0 – 1000 »	



PINÇA WATTIMÉTRICA

7 ESCALAS

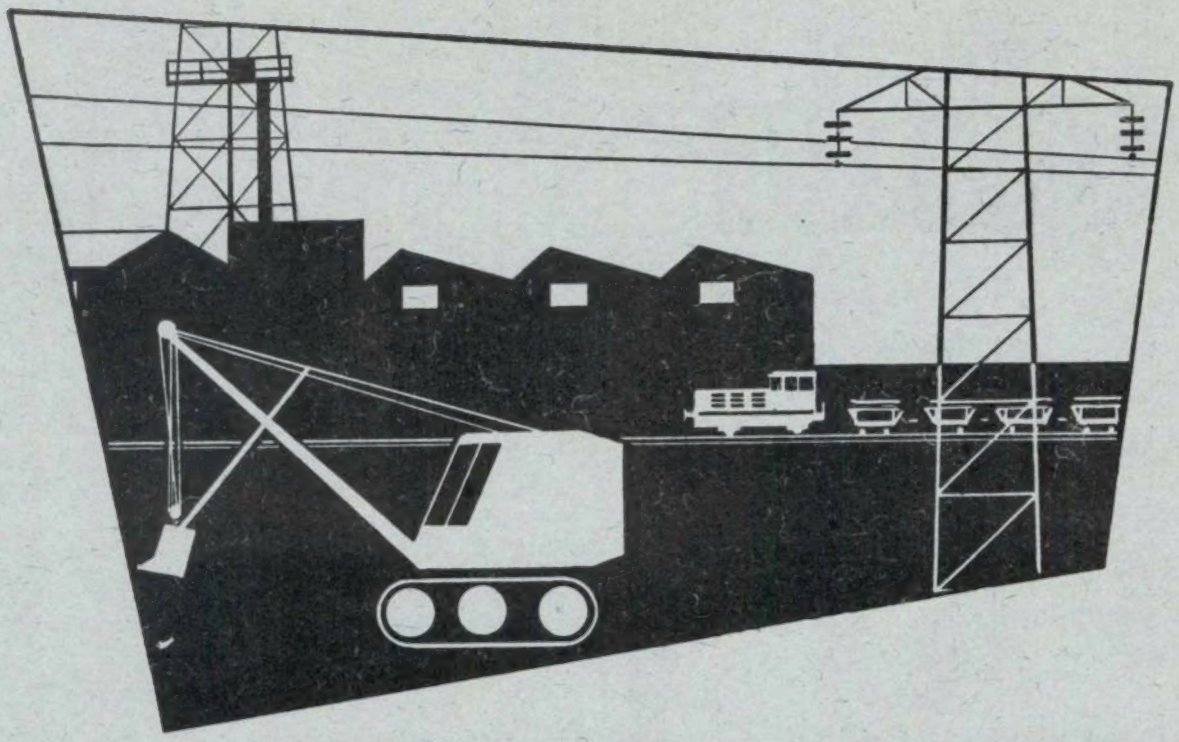
0 – 3 KW
0 – 6 »
0 – 12 »
0 – 30 »
0 – 60 »
0 – 120 »
0 – 300 »

REPRESENTANTES:

C. SANTOS, S. A. R. L.

29, AVENIDA DA LIBERDADE, 41 — LISBOA

DIVISÃO MARÍTIMA E INDUSTRIAL
AVENIDA DA LIBERDADE, 29-41 — LISBOA
160, RUA STA. CATARINA, 168 — PORTO



MERCEDES-BENZ

MOTORES INDUSTRIAIS DIESEL

MOTORES PARA TODAS AS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS
FAMOSOS EM TODO O MUNDO PELA SUA GRANDE ROBUSTÊS, ECONOMIA
DE CONSUMO E FACILIDADE DE MANUTENÇÃO
MODELOS DESDE 15 A 2.500 H. P.

EM ARMAZÉM:

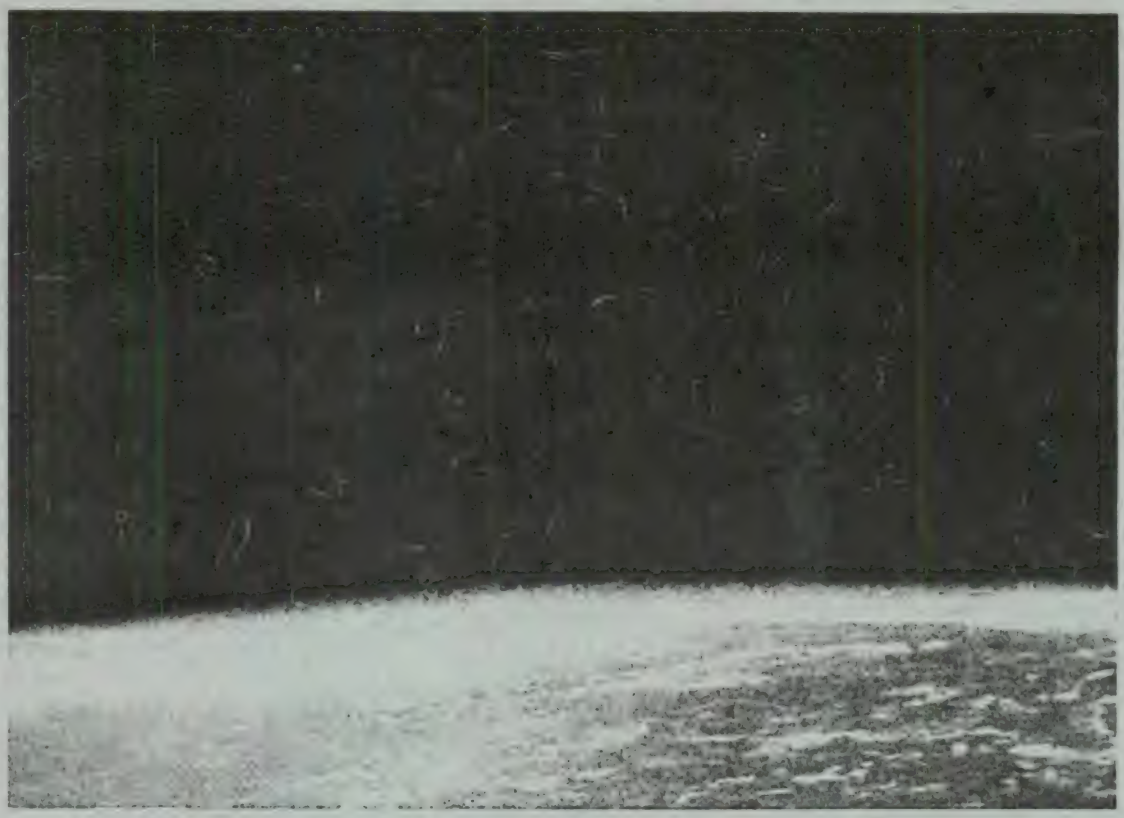
MODELO M B 841 B	25 H. P. — 1.000 R. P. M.
MODELO M 202 B	55 H. P. — 1.200 R. P. M.
MODELO M 203 B	90 H. P. — 1.200 R. P. M.
MODELO M 204 B	120 H. P. — 1.200 R. P. M.

OUTROS MODELOS PARA ENTREGA MUITO RÁPIDA

MOTORES A 4 TEMPOS · ARREFECIMENTO POR ÁGUA
ARRANQUE A AR COMPRIMIDO OU ELÉCTRICO

REPRESENTANTES C. SANTOS, S. A. R. L. — DIVISÃO MARÍTIMA E INDUSTRIAL

29, AV. DA LIBERDADE, 41 — LISBOA
160, R. DE S.TA CATARINA, 168 — PORTO



QUALQUER EXCURSÃO À VOLTA DO MUNDO COMEÇA NO EDIFÍCIO DA ITT EM NOVA IORQUE

Porque não dar uma vista de olhos ao nosso planeta a partir de outro ângulo?

Para tal é preciso ir onde haja explorações diárias dos polos ao fundo do mar. E isso só no Edifício da ITT em Nova Iorque.

Aí a ITT prossegue nessa tarefa com a colaboração das suas fábricas espalhadas em mais de 50 países do mundo, nas quais mais de 150 000 pessoas dão o melhor do seu esforço para conseguir novas técnicas e novos processos. Mas que género de trabalho é esse? São as telecomunicações e a electrónica. Na ânsia de um mundo melhor e unido os homens procuram ligar-se, entender-se, comunicar. E as companhias da ITT fornecem esse meio. Conquanto que cada fábrica produza vários tipos de materiais, há, todavia, um ou outro produto especial que abastece todas as fábricas do Sistema.

Assim, em Lisboa fabricam-se radiossondas e emissores de comunicações SSB; em Madrid, cabos e telefones; em Paris, equipamentos de telecomunicações troposféricas e centrais telefónicas; em Viena, intercomunicadores; em Antuérpia, sistemas de tubos pneumáticos para rápido transporte de correspondência; em Copenhague, equipamentos radiomarítimos; em Estugarda, Alemanha, equipamentos para navegação aérea e transmissores; em Milão, equipamentos de microssondas; em Oslo, frigoríficos, fios e cabos; em Estocolmo, equipamentos telefónicos variados; em Zurique, componentes; em Croydon, Inglaterra, teleimpressoras; em Londres, cabos submarinos e receptores de rádio e TV; em Chicago, equipamento militar; em Buenos Aires, rádio e TV; no Rio de Janeiro, electro-domésticos; na cidade do México e no Chile, aparelhos telefónicos, etc. Muitas outras companhias estão espalhadas pela África, Japão, Austrália, etc.

A **Standard Electrica, S.A.R.L.**

É UMA ASSOCIADA DA **ITT**

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

CAVAN

SOCIEDADE PORTUGUESA

✱

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS

MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

MANILHAS PARA ESGOTOS

✱

RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A

TELEF. 47812-50129

LISBOA

GM 1292/5

Georges Fischer Sociedade Anónima, Schaffhouse (Suiça)

Telefone: (053) 5 60 31 / 5 70 31 Telegrammas: Geofischer Telescriptôr: 5 29 15 geofischer schf

Celulite

ISOLAMENTO
TÉRMICO DAS
CONSTRUÇÕES

PAVIMENTOS
*
TECTOS
*
PAREDES
*
CÂMARAS
FRIGORÍFICAS
*
ISOLAMENTOS
INDUSTRIAIS

Terraços e pavimentos isolados com CELULITE no edifício da Comp.ª de Seguros Fidelidade — P. das Águas Livres — Lisboa

SETH, LDA. • RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.° • TEL. 73 01 56 — LISBOA

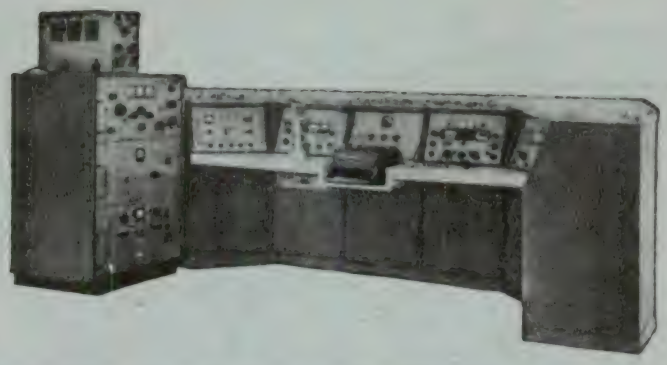
Para impermeabilizar terraços,
paredes, fundações, etc.

COLAGEM DE
TACOS DE MADEIRA

TELEF. 73 0156 TELEG. EPALDA — LISBOA

EMPREZA DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS
IMPERMEABILISADOR
IMEPA
RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.º-LISBOA

FÁBRICA EM SACAVÉM



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

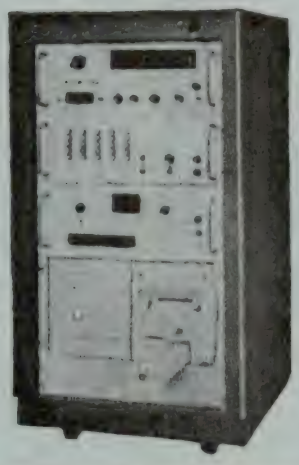
THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

HEWLETT **PACKARD**

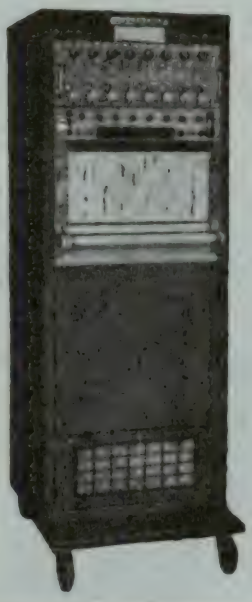
aparelhagem electrónica de medida e registo

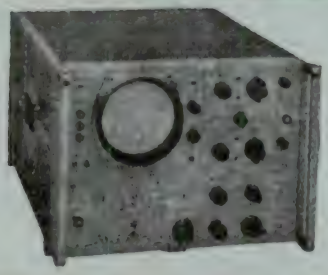
Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador digital Dymec



Registador Sanborn





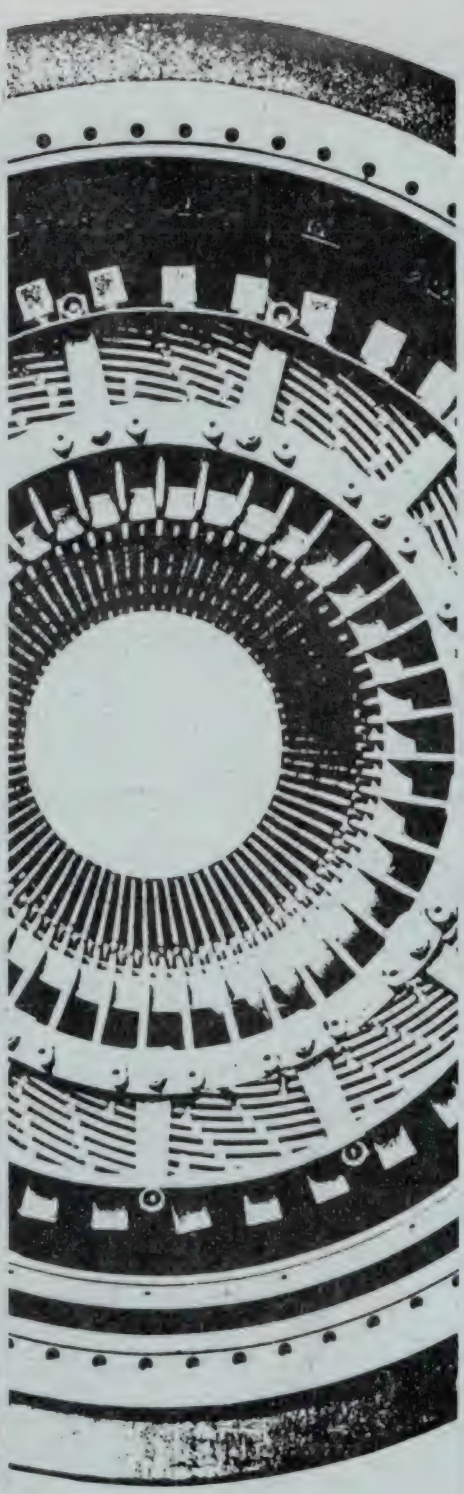
Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

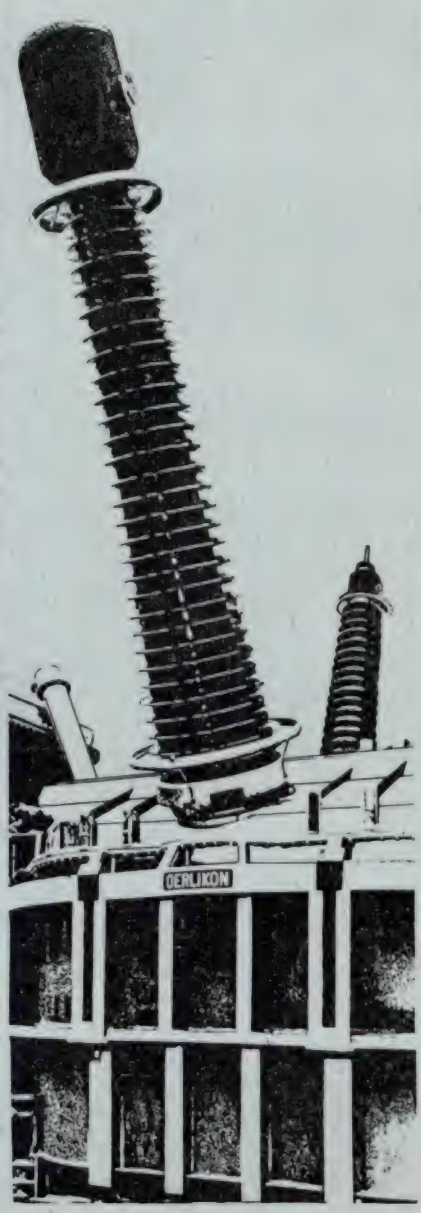
TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

Oerlikon

na vanguarda em maquinaria eléctrica pesada, aparelhos, transformadores e equipamentos de tracção



Ateliers de Construction Oerlikon Zurich/Suiça



Companhias associadas em toda a parte do mundo

Em Portugal e Ultramar:
Soc. Mich. de Vasconcellos Lda.
Lisboa e Porto

técnica

DIRECTOR: J. F. GOMES DE PINA

Ano XL — N.º 349 Junho de 1965

C. D. U. 691.545

POZOLANAS DE ALTA REACTIVIDADE INICIAL — I

A REACTIVAÇÃO DA POZOLANA NATURAL

Pelo Eng.º Civil (I. S. T.) A. DE SOUSA COUTINHO
Investigador do Laboratório Nacional
de Engenharia Civil

RESUMO

Neste artigo é apresentado um método para melhorar a reactividade de certas pozolanas naturais por meio de um tratamento térmico adequado.

No primeiro capítulo estuda-se a maneira de proceder à reactivação e é dada uma explicação deste fenómeno.

No segundo capítulo apresentam-se os resultados das determinações das propriedades da pozolana natural reactivada: influência nas tensões de rotura do betão, no coeficiente de permeabilidade, nos calores de hidratação e na resistência à agressividade de natureza química.

A reactivação mais importante é obtida com um tipo de tufo traquítico muito alterado, a que pertence a pozolana natural da ilha de Santo Antão (Arquipélago de Cabo Verde) e consiste em retirar a água adsorvida nos grãos deste material. Isto consegue-se por meio de aquecimento a 350°C seguido por arrefecimento, que deve ser realizado ao abrigo do ar, por exemplo em ambiente fechado ou o mais ràpidamente possível, de modo a evitar a readsorção das moléculas de vapor de água da atmosfera. A conservação subsequente da pozolana assim tratada deve ser feita também em recipientes impermeáveis ao vapor de água, tais como os usados correntemente na conservação dos ligantes hidráulicos.

Estuda-se ainda a reactivação de outras pozolanas naturais, como a das Pedras Pretas (da ilha de Porto Santo, do Arquipélago da Madeira) e a do Pedregal (da ilha de S. Miguel, do Arquipélago dos Açores). Mas a eficiência da reactivação destas pozolanas, realizada aliás a temperaturas superiores, de 600° a 700°C, é bastante pequena, e não é provocada pela saída de água adsorvida. Deve-se essencialmente à transformação em pozolana das argilas que elas contêm.

Com a reactivação da pozolana natural de Santo Antão consegue-se obter uma pozolana de alta reactividade inicial, isto é, de uma pozolana que, quando substitui parte do cimento no betão, lhe confere tensões de rotura a 28 dias superiores às que possui quando se usa apenas cimento portland.

Com a reactivação das outras pozolanas naturais estudadas, das Pedras Pretas e do Pedregal, sòmente é possível aumentar a reactividade a longo prazo: a recuperação ao fim de 1 ano das tensões de rotura do betão no qual se substitui parte do cimento por pozolana reactivada é bastante maior do que no caso da não reactivada.

O coeficiente de permeabilidade do betão é substancialmente diminuido pela pozolana natural de Santo Antão reactivada.

Os calores de hidratação e a resistência à acção dos sulfatos ficam pràticamente sem alteração, ou são muito ligeiramente melhorados, pela reactivação da pozolana natural.

O emprego da pozolana natural de Santo Antão reactivada permite obter cimentos pozolânicos de emprego perfeitamente geral, e de qualidade superior à do cimento portland.

0 . INTRODUÇÃO

Em diversos artigos já publicados (0.1) (0.2) definimos a pozolana como um material que, não tendo por si só propriedades aglomerantes hidráulicas é capaz de substituir parte do cimento dos betões e das argamassas, reagindo com os seus componentes e com o hidróxido de cálcio, originando compostos de grande estabilidade com propriedades aglomerantes que melhoram certas características do cimento portland, como a resistência aos agentes químicos agressivos, a tensão de rotura à tracção e o calor de hidratação. Esta melhoria dalgumas propriedades aumenta a resistência à corrosão e diminui o risco de fissuração do betão em grandes massas.

Todavia, um dos inconvenientes da utilização da pozolana em muitas das aplicações correntes consiste na diminuição das tensões de rotura iniciais das argamassas e betões. Seria por isso desejável a obtenção de pozolanas que, quando convenientemente preparadas, não conduzissem a esse abaixamento da resistência inicial. O interesse da utilização de tais pozolanas seria ainda engrandecido se com elas fosse possível aumentar as tensões de rotura iniciais das argamassas e betões. A estas pozolanas chamaremos *pozolanas de alta reactividade inicial.*

O emprego das pozolanas de alta reactividade inicial permitiria obter ligantes capazes de atingir resistências mecânicas iguais ou superiores às do cimento portland, possuindo as vantagens conferidas pela baixa alcalinidade (elevada resistência química aos agentes agressivos).

Efectivamente, o cimento portland não pode, por si só, responder a todas as exigências da construção. Um cimento pozolânico ou uma mistura de cimento e pozolana (se a adição da pozolana especialmente tratada se fizer na betoneira) com resistências às forças e aos agentes químicos superiores às do cimento portland, de calor de hidratação mais baixo, e extensibilidade superior, é certamente um cimento de utilização muito mais geral e de segurança muito mais elevada do que as do cimento portland.

As pozolanas de alta reactividade inicial permitem atingir este objectivo.

O trabalho que se vai seguir decompõe-se em duas partes: na primeira parte, que se apresenta neste artigo e no que se segue, é abordada a questão do aumento da reactividade da pozolana natural por meio de um tratamento térmico que consiste em a sujeitar à acção de determinado ciclo de aquecimento e arrefecimento, conduzido de maneira especial.

O tratamento térmico das pozolanas naturais já tem sido estudado algumas vezes, mas encontram-se, na literatura, indicações contraditórias sobre a sua acção (0.3) devido à enorme variedade dos materiais pozolânicos. Nos casos por nós estudados veremos que é possível fazer determinados tratamentos térmicos que aumentam muito a reactividade de certas pozolanas naturais.

Outros processos de aumentar a reactividade inicial da pozolana consistem em a tratar com ácidos ou álcalis; o seu tratamento prévio com ácido parece provocar a formação de sílica reactiva, e a utilização de pequenas percentagens de álcalis promove uma reacção de troca entre os iões cálcio do componente básico (cimento hidratado ou cal hidratada) e os iões alcalinos do componente ácido (pozolana), o que equivale a acelerar a reacção da pozolana. Estes métodos, preconizados e estudados por Alexander (0.4) (0.5) e Ferrari (0.6) não foram, todavia, objecto dos nossos trabalhos.

Na segunda parte, a apresentar num próximo artigo, é feito o estudo da reactividade pozolânica do caulino e da diatomite tratados tèrmicamente (pozolanas artificiais).

Encontram-se algumas referências à reactividade pozolânica do caulino (0.7) (0.8) e da diatomite tratados (0.9) (0.10), mas não conhecemos estudos sistemáticos, como aqueles que iremos apresentar, sobre a influência destas pozolanas artificiais nas propriedades dos betões de cimento portland: tensão de rotura com diferentes percentagens de substituição, coeficiente de permeabilidade, calor de hidratação e resistência à agressividade de natureza química.

Ver-se-á então que há alguns destes produtos susceptíveis também de terem excelente aplicação como pozolanas de alta reactividade inicial, e portanto capazes de originarem ligantes dotados de resistência química muito mais elevada do que a do cimento portland, e capazes de serem utilizados em betão de elevada resistência mecânica inicial.

Embora todo o trabalho experimental em que estes artigos se baseiam tenha sido inteiramente realizado com a pozolana usada como aditivo ao betão (ou à argamassa), no qual substitui parte

do cimento, os resultados obtidos levam a admitir a hipótese de uma melhoria apreciável nos casos de a submeter a um tratamento térmico mais adequado que aquele que foi possível realizar no laboratório e de a utilizar em moedura conjunta com o clínquer.

CAPÍTULO 1 — ESTUDO DA REACTIVAÇÃO TÉRMICA DA POZOLANA NATURAL E DAS SUAS CAUSAS

1. Generalidades sobre o tratamento térmico da pozolana natural. — Na literatura encontram-se publicados alguns resultados sobre a influência do aquecimento na reactividade da pozolana natural. Todavia, tais resultados, fragmentários e em número reduzido, são por vezes contraditórios, não existindo nenhum trabalho sistemático publicado sobre a reactivação da pozolana natural pela acção de tratamentos térmicos, excepção feita dum bom trabalho de Turriziani e Schipa (1.1), ao qual será feita referência mais adiante, onde se procura fazer uma teorização deste assunto. Mas os dados em que se baseia tal teorização são bastante insuficientes.

No entanto, uma das opiniões mais frequentes nas observações publicadas é a de que o tratamento térmico das pozolanas naturais ou não altera a reactividade pozolânica ou a diminui (1.2).

C. Malquori (1.3) estudou as propriedades das pozolanas naturais tratadas durante 10 h a diferentes temperaturas. No caso dos materiais tratados a 700°C — 800°C observou diminuições sensíveis na velocidade de absorção da cal e na quantidade de material solubilizado pelo ácido clorídrico. Isto indica uma perda na reactividade.

Sestini e Santareli (1.4) aqueceram durante 1 h a 700°C diferentes pozolanas laciais e flegrianas, deixando-as depois arrefecer lentamente no forno, e ensaiando-as imediatamente. Escolheram a temperatura de 700°C por ter demonstrado produzir maior aumento na reactividade pozolânica dos materiais argilosos.

A observação da pozolana assim tratada ao microscópio e aos raios X provou que ela não tinha sofrido alteração de qualquer espécie.

Os autores concluiram então que o aumento da reactividade pozolânica da pozolana natural com o tratamento térmico, quando se verifica, é devido à existência de materiais argilosos com os quais está misturada.

A. Maffei (1.5) concluiu que as pozolanas naturais tratadas a 700°C apresentavam uma nítida queda na reactividade.

No conhecido trabalho americano de Mielenz, Witte e Glantz (0.6) também se conclui que as pozolanas contendo vidros vulcânicos são muito pouco influenciadas pela calcinação, pois os constituintes activos não sofrem variações apreciáveis até cerca de 870°C a 980°C.

A reactividade da terra de Santorin (0.3) não sofre variação por efeito do aquecimento a 300°C. A reactividade do «trass» também não sofre alteração até 500°C.

Um dos trabalhos em que a questão do tratatimento térmico foi abordada com maior sistemacidade é o de Turriziani e Schippa (1.1), que estudaram a pozolana lacial, considerada um vidro vulcânico muito alterado.

Observaram uma diminuição da reactividade da pozolana tratada a temperaturas desde 400°C até 750°C. A 400°C ainda não foi notada qualquer alteração na reactividade pozolânica. A 600°C começaram a observar uma perda de reactividade, que se acentuou com o tratamento a 750°C. Esta temperatura de 750°C não foi ultrapassada para evitar fenómenos de fusão incipiente.

Com base nestes resultados fizeram uma série de experiências com velocidades de aquecimento e de arrefecimento variáveis. Estas experiências mostraram que a reactividade pozolânica ficava inalterada.

No entanto, verificaram que a duração do tratamento térmico tinha influência na perda da reactividade pozolânica. A 600°C e a 750°C esta é mais sensível após um tratamento de 200 h do que após 3 h. Não notaram quaisquer diferenças na reactividade da pozolana tratada a 400°C, mesmo durante 300 h.

Turriziani explica os resultados obtidos à luz do que é conhecido sobre a génese das pozolanas laciais; a reactividade de tais materiais é devida principalmente aos seus constituintes vitrosos e de textura microporosa que se formaram durante as erupções vulcânicas de carácter explosivo.

Um tratamento térmico com uma duração suficiente, e a temperaturas bastante elevadas, mas abaixo do ponto de amolecimento, tem por efeito levar o material a condições de maior estabilidade, diminuindo a sua energia interna.

Os resultados mais optimistas são os obtidos por F. Ferrari, que é um grande apologista do tratamento térmico da pozolana natural. Efectivamente, Fabio Ferrari (1.6) descobriu que ao dissecar algumas pozolanas naturais do grupo dos tufos vulcânicos a 100 — 150°C, a reactividade diminuia. Pelo contrário, aquecendo-as durante várias horas a 150°C, a reactividade voltava a crescer.

Ferrari (1.7) diz também que o aquecimento destas pozolanas naturais a temperaturas mais elevadas, (300 — 350°C) durante um curto intervalo de tempo, seguido por arrefecimento rápido, aumenta a sua reactividade. Este método aplica-se aos materiais capazes de perderem entre 100 e 350°C quase toda a água que contém. (1.8) (1.9)

No tratamento destes materiais a sua temperatura deve passar de 100°C até 300 — 350°C em cerca de 15 minutos, e, se possível, em movimento, como nos exsicadores rotativos. Depois deverá manter-se esta temperatura de 300 — 350°C até que a perda de peso seja muito próxima da perda a 1000°C (30 minutos). Em seguida devem ser ràpidamente resfriados até à temperatura ambiente, e usados logo a seguir (moídos com cal ou com cimento, ou misturados com estes elementos para fazer argamassas e betões). Expondo-os durante muito tempo ao ar tendem a combinar-se com a humidade atmosférica, mostrando perda da reactividade pozolânica.

É também citado na literatura (0.3) que as pozolanas italianas beneficiam por um tratamento de 300 a 700°C e são assim usadas na fabricação do cimento pozolânico.

De todas estas observações é possível talvez concluir que a influência do tratamento térmico sobre a reactividade será variável com o tipo da pozolana.

Para certos materiais, o tratamento até 400°C poderá desidratá-los sem qualquer alteração na estrutura atómica — estrutura totalmente desorganizada, amorfa, de elevada energia, de que depende a sua reactividade — mas o aquecimento mais ou menos prolongado a temperaturas superiores diminui a reactividade, até a fazer perder, por ir influenciar aquela estrutura promovendo certas ligações mais organizadas, de carácter cristalino, e diminuindo portanto a energia interna.

Para outros materiais a eliminação da água a temperaturas até cerca de 400°C, desde que não conduza a uma alteração na estrutura, para o que terá de ser feita com suficiente rapidez, melhora a reactividade, devido talvez ao aumento da porosidade ou melhor, ao aumento da energia da superfície do grão de pozolana que inicialmente estava diminuída pelo adsorção de moléculas de água, como veremos no decurso deste artigo.

Finalmente, para um terceiro tipo de materiais o efeito principal do tratamento térmico pode ser o de calcinar quaisquer impurezas de argila que a pozolana natural contenha, passando-as de constituintes inertes a constituintes pozolânicos, e aumentando, por este facto, a reactividade pozolânica.

2. Programa das experiências realizadas sobre o tratamento térmico dalgumas pozolanas naturais. — Apesar de os resultados indicados na literatura sobre a reactivação da pozolana natural serem de carácter essencialmente negativo, excepção feita aos trabalhos do prof. F. Ferrari, e depois de algumas experiências preliminares realizadas com a pozolana de Santo Antão nos terem animado a prosseguir, decidimo-nos a fazer um estudo sistemático da reactivação térmica sobre três pozolanas naturais: a da ilha de Santo Antão (Arquipélago de Cabo Verde), a das Pedras Pretas, da ilha de Porto Santo (Arquipélago da Madeira) e a do Pedregal, da ilha de S. Miguel (Arquipélago dos Açores).

Resolvemos seguir as ideias de Ferrari e de Turriziani no que respeita à duração do tratamento térmico: subida de temperatura e arrefecimento muito rápidos a fim de evitar, tanto quanto possível, a perda de energia interna do material.

Todavia, deve notar se que em virtude de se não dispor, no laboratório, de aparelhagem para o aquecimento do material em movimento, teve de se empregar uma mufla, cuja inércia não permitiu um aquecimento tão rápido como o preconizado por Ferrari. Por outro lado, para provocar um aquecimento rápido e uniforme da pozolana, toda a que fosse colocada na mufla deveria seguir a temperatura do ambiente, o que sòmente seria possível se a espessura da camada fosse a menor possível. Nestas condi-

ções a quantidade de material preparado seria muito reduzida.

Depois de várias tentativas e ensaios com a pozolana de Santo Antão em que se mediram temperaturas com pares termo-eléctricos ao longo da espessura de diferentes camadas, chegou-se à conclusão que a espessura não deveria ser superior a 15 mm.

Efectivamente, enquanto a temperatura no interior da mufla sobe desde a ambiente até 350°C em 30 minutos, a sua uniformidade ao longo da espessura duma camada com 15 mm é obtida ao fim de 80 minutos. Se o material à temperatura ambiente for colocado no interior da mufla que já está a cerca de 350°C, então a uniformidade em toda a espessura da camada é obtida ao fim de 60 minutos, mas a lei de evolução da temperatura difere muito mais de ponto para ponto do que no primeiro caso.

Para aumentar a uniformidade do tratamento do material fizeram-se outras experiências com camadas de 5 mm e de 1,5 mm de espessura, mas nas quais já não foi possível medir a variação da temperatura ao longo da sua espessura. Por isso fez-se a comparação das propriedades da pozolana preparada em camadas com estas espessuras sujeita a uma temperatura constante durante intervalos de tempo variáveis, como veremos a seguir.

Por outro lado, como notaremos no decurso deste artigo, visto que a reactivação da pozolana de Santo Antão está ligada ao fenómeno da sua desidratação, ou melhor da saída da água adsorvida à superfície dos grãos, reconheceu-se depois que a obtenção da igualdade de temperatura ao longo de toda a espessura não significa uniformidade de tratamento, isto é, não significa que todo o material esteja sujeito ao mesmo tratamento térmico. Efectivamente, tem de se atender à difusão das moléculas de água através da camada, difusão que é bastante mais lenta do que a do calor.

Assim, se numa camada com 1,5 mm de espessura a uniformidade da temperatura é obtida quase instantâneamente, veremos (§ 5) que a saída total da água só se dá ao fim de 3 horas e, se a espessura é de 15 mm, a saída de toda a água apenas se verifica ao fim de mais de 24 horas (fig. 5.1).

Quanto ao arrefecimento, ele é evidentemente muito mais fácil de obter em condições de rapidez satisfatória. Na primeira fase dos trabalhos, enquanto a questão da duração do ciclo térmico não estava ainda bem esclarecida, após o aquecimento a pozolana era retirada da mufla à temperatura de tratamento e colocada ràpidamente em tabuleiros de alumínio, que estavam por sua vez em banho-maria, dentro de água fria. A pozolana era então arrefecida em camadas com a espessura de apenas alguns milímetros, sendo mantida em agitação com uma espátula. A obtenção do equilíbrio térmico com a atmosfera fazia-se ao fim de um intervalo de tempo inferior a cerca de 3 a 4 minutos.

Dado o desconhecimento inicial da melhor temperatura de tratamento, e com a ideia de que tal temperatura deveria ser função da natureza do material, decidiu-se fazer o tratamento das três pozolanas a diferentes temperaturas, entre 100°C e 1000°C.

Os primeiros ensaios realizados com a pozolana de Santo Antão revelaram uma singularidade entre 300°C e 400°C e por isso, segundo as ideias de Ferrari, apertou-se o intervalo de 300 a 400°C para esta pozolana. Para as outras, as temperaturas variaram mais largamente.

Em resumo, o tratamento térmico foi realizado nas seguintes condições.

a) — Obtenção duma dada temperatura, T, constante, na mufla com os tabuleiros refractários que devem conter o material a tratar, vazios.

b) — Colocação duma determinada quantidade de pozolana em cada tabuleiro de modo a obter uma camada com a espessura de 5 mm (no caso da pozolana de Santo Antão) ou de 15 mm (no caso das do Pedregal e Pedras Pretas).

c) — Manutenção do material durante uma hora à temperatura T.

d) — Arrefecimento rápido, do modo indicado mais acima.

e) — Amassadura das argamassas de cimento e pozolana e das pastas de cal e pozolana.

Logo que o material era retirado da mufla à temperatura do tratamento procedia-se imediatamente à sua pesagem, de modo a determinar a perda de peso àquela temperatura.

Com os materiais assim tratados amassaram-se pastas normais de cal e pozolana (2.1) e argamassas normais de cimento e pozolana (2.2). As pastas normais de cal e pozolana são compostas por uma mistura de 1 parte de cal aérea hidratada e seca a 100°C, para 3 partes, em peso, de

pozolana, amassada com a quantidade de água necessária para lhe dar a consistência normal. As argamassas normais de cimento, pozolana e areia são compostas por 3 partes de areia normal do Alfeite, 0,7 partes de cimento, 0,3 partes de pozolana e 0,5 partes de água, em peso.

Com estas pastas e argamassas normais moldaram-se prismas com $4 \times 4 \times 16$ cm^3 que se conservaram nos moldes durante as primeiras 24 h, numa atmosfera saturada de humidade. Ao fim de 24 h foram desmoldados e conservados dentro de água até à data dos ensaios. Determinaram-se as tensões de rotura à flexão e à compressão aos 7 dias, 28 dias e 3 meses. Os ensaios mais importantes prolongaram-se, no entanto, até idades superiores.

3. Características das pozolanas naturais em estudo. — Como foi referido mais atrás o estudo da reactivação das pozolanas naturais incidiu sobre três tipos: a de Santo Antão, a das Pedras Pretas e a do Pedregal.

As duas primeiras foram já descritas em outras publicações (0.1) (0.2). A de Santo Antão é proveniente de um tufo traquítico, de cor clara, extremamente poroso; a das Pedras Pretas é proveniente de um tufo basáltico muito alterado, de cor escura e de elevado peso específico e, finalmente, a do Pedregal é também de origem traquítica, de peso específico intermédio e de cor escura.

As suas composições químicas e os parâmetros principais de Niggli que delas se deduzem, e que permitem fazer a sua classificação geológica, estão indicados no quadro 3.1.

Os materiais foram levados, antes do tratamento térmico, a uma finura elevada, obtida por moedura durante 8 h num moínho de bolas de laboratório, com 39 cm de diâmetro interno, 42 cm de comprimento, dando 32 rotações por minuto, accionado por um motor de 0,85 C.V., e com uma carga composta por 45 kg de esferas de aço com cerca de 4 cm de diâmetro e por 15 kg do material a moer.

Adoptou-se este tempo de moedura porque, em virtude de diferentes ensaios realizados, se admite que o material moído nestas condições ficará com uma finura pouco mais ou menos equivalente à que se obtém numa moedura com clínquer de cimento em moínho de bolas industrial.

As características da finura destas pozolanas estão indicadas no quadro 3.2.

QUADRO 3.1

Composições químicas e parâmetros principais de Niggli das pozolanas naturais estudadas

Pozolana	Perda de peso, %		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	MnO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	SO_3	Parâmetros principais de Niggli				
	Entre 100 e 500 °C	Entre 500 e 1000 °C	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	si	al	fm	c	alk
St.º Antão (Cabo Verde)	10,6	1,7	49,2	20,6	2,3	0,0	1,4	0,2	1,8	6,2	5,2	0,2	0,0	0,5	179	44	15	7	34
Pedras Pretas (ilha de Porto Santo-Madeira)	5,7	3,1	43,7	16,8	11,1	—	4,1	—	6,6	3,8	1,2	—	—	3,0	118				
Pedregal (ilha de S. Miguel — Açores)	3,5	0,6	60,0	17,7	4,5	1,4	1,2	0,1	1,1	4,6	5,3	0,8	—	—	231	40	25	5	30

QUADRO 3.2

Características da finura das pozolanas naturais estudadas

Características		Santo Antão	Pedras Pretas	Pedregal
Massa específica, g cm^{-3}		2,16	2,45	2,48
Superfície específica Blaine, cm^2 g^{-1}		10190	7760	8440
Resíduo no penairo de 88 μ (4900 malhas por cm^2), %		0,6	17	8
Resíduo no peneiro de 44 μ (via húmida), %		9	11	14
Análise por fluorometria	Peso, em percentagem, das partículas de dimensão inferior a			
	17 μ	—	45 %	57 %
	18 μ	61 %	—	—
	34 μ	—	61 %	76 %
	36 μ	80 %	—	—
	51 μ	—	68 %	81 %
	54 μ	88 %	—	—

QUADRO 3.3

Resistências das pastas normais de cal e pozolana

Pozolana	Ensaio	Idade			
		7 dias	28 dias	3 meses	1 ano
Santo Antão	Flexão, kg cm^{-2}	27	30	32	30
	Compressão, kg cm^{-2}	112	138	166	185
Pedras Pretas	Flexão, kg cm^{-2}	1	18	21	35
	Compressão, kg cm^{-2}	2	50	99	119
Pedregal	Flexão, kg cm^{-2}	10	26	31	—
	Compressão, kg cm^{-2}	24	101	168	—

No quadro 3.3 estão registados os resultados dos ensaios de resistência em pasta de cal, feitos de acordo com o «Caderno de encargos para o fornecimento e recepção de pozolanas», (2.1) até 1 ano de idade.

4. **Acção da temperatura sobre as pozolanas naturais.** — Na fig. 4.1 estão indicadas as perdas de peso dos três materiais em estudo, referidas ao peso a 100°C.

A pozolana de Santo Antão, até 200°C, apresenta uma perda de cerca de 5 %. Acima de 200°C e até 600°C a variação de peso com a temperatura é um pouco menos acusada. Entre 600°C e 900°C a variação é apenas de 1 %.

Esta pozolana apresenta cerca de dois terços da sua perda total de peso entre 100°C e 350°C, enquanto a das Pedras Pretas perde uma fracção idêntica entre 100°C e 600°C e a do Pedregal entre 100°C e 700°C.

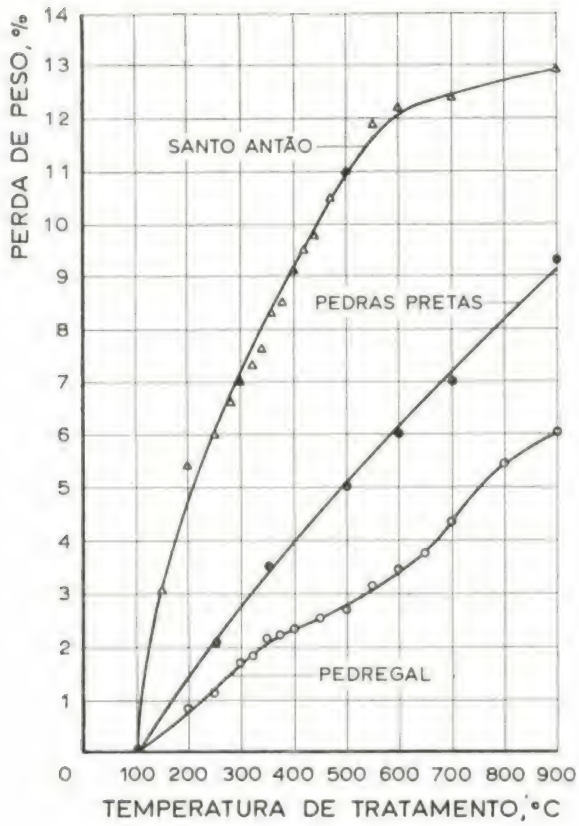


Fig. 4.1 — Perda de peso, com a temperatura, das três pozolanas naturais.

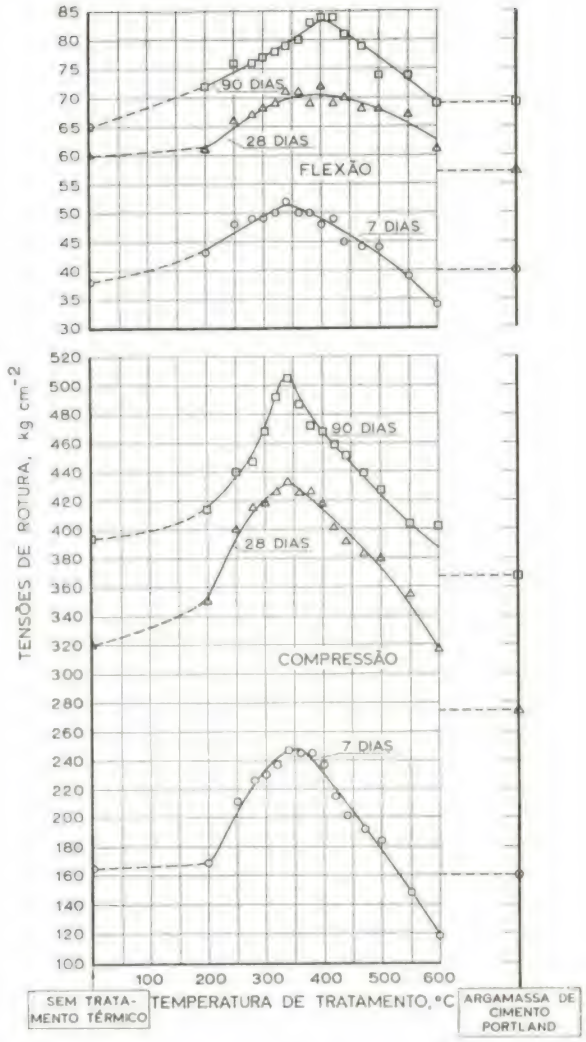


Fig. 4.2 — Pozolana natural de Santo Antão — Variação da reactividade, medida pelo ensaio de resistência de argamassas normais de cimento e pozolana, com a temperatura de tratamento.

A curva de variação do peso da pozolana das Pedras Pretas mostra uma regularidade muito grande, enquanto a do Pedregal mostra duas singularidades, uma à roda de 350°C e outra de 650°C a 800°C.

A 1000°C as três pozolanas em estudo fundem completamente, o que se justifica devido à elevada percentagem de álcalis que apresentam.

Quanto às tensões de rotura conferidas às pastas e argamassas normais pela pozolana tratada às diferentes temperaturas tal como ficou indicado no final do § 2, as figs. 4.2 e 4.3 mostram os resultados obtidos.

O primeiro facto mais importante que resulta da observação destas experiências é o considerável aumento da resistência das argamassas normais conferido pela acção da temperatura sobre a pozolana natural de Santo Antão (fig. 4.2): o aumento atinge, em relação às tensões de rotura das argamassas de cimento portland, em média 50 % na compressão e 25 % na flexão.

As pozolanas do Pedregal e das Pedras Pretas (fig. 4.3) não mostram o substancial aumento na resistência que apresenta a de Santo Antão. A sujeição da pozolana do Pedregal a temperaturas iguais e inferiores a 300°C provoca até uma diminuição da reactividade. O máximo de reactivação destas pozolanas não consegue ultrapassar as tensões de rotura do cimento portland, excepto na flexão a 3 meses (pozolana do Pedregal) e a 28 dias e 3 meses (pozolana das Pedras Pretas), embora consiga, efectivamente, melhorar as tensões de rotura que são alcançadas com a pozolana não reactivada.

Para a pozolana de Santo Antão a temperatura óptima de tratamento é de 340°C.

Todavia, na flexão, a 28 dias e a 3 meses, a temperatura óptima é de 400°C.

MAGUE

Pórtico rolante eléctrico de 5t/7,5m, com colher, em serviço nas instalações da Siderurgia Nacional, no Seixal.

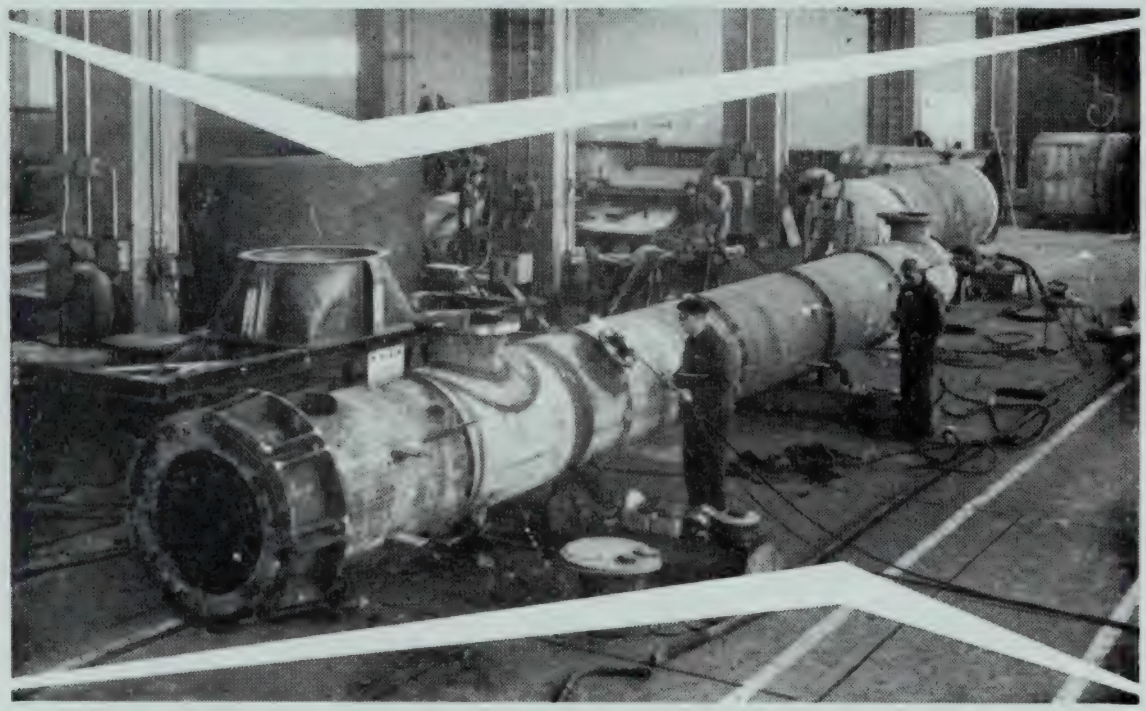
PONTES ROLANTES — *Projecto e fabrico*
GUINDASTES — *Projecto e fabrico*
APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS — *Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS — *Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey*
TURBINAS A VAPOR — *Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie*
EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L.

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

aços vazados
ferros meehanite
mecânica MÉDIA E PESADA
construções metálicas

COMPORTAS
TURBINAS
CONDUTAS FORÇADAS
RESERVATÓRIOS SOB PRESSÃO
PERMUTADORES DE CALOR



Indústria dos Petróleos.

Coluna de 1.000 mm ø × 10 000 mm, em fase final de fabrico.

DIVISÃO METALO-MECÂNICA
COMPANHIA UNIÃO FABRIL

AVENIDA 24 DE JULHO, 170 — LISBOA 2 ✦ TELEFONES 67 04 21 E 67 20 61 ✦ TELEGRAMAS: METALOFABRIL

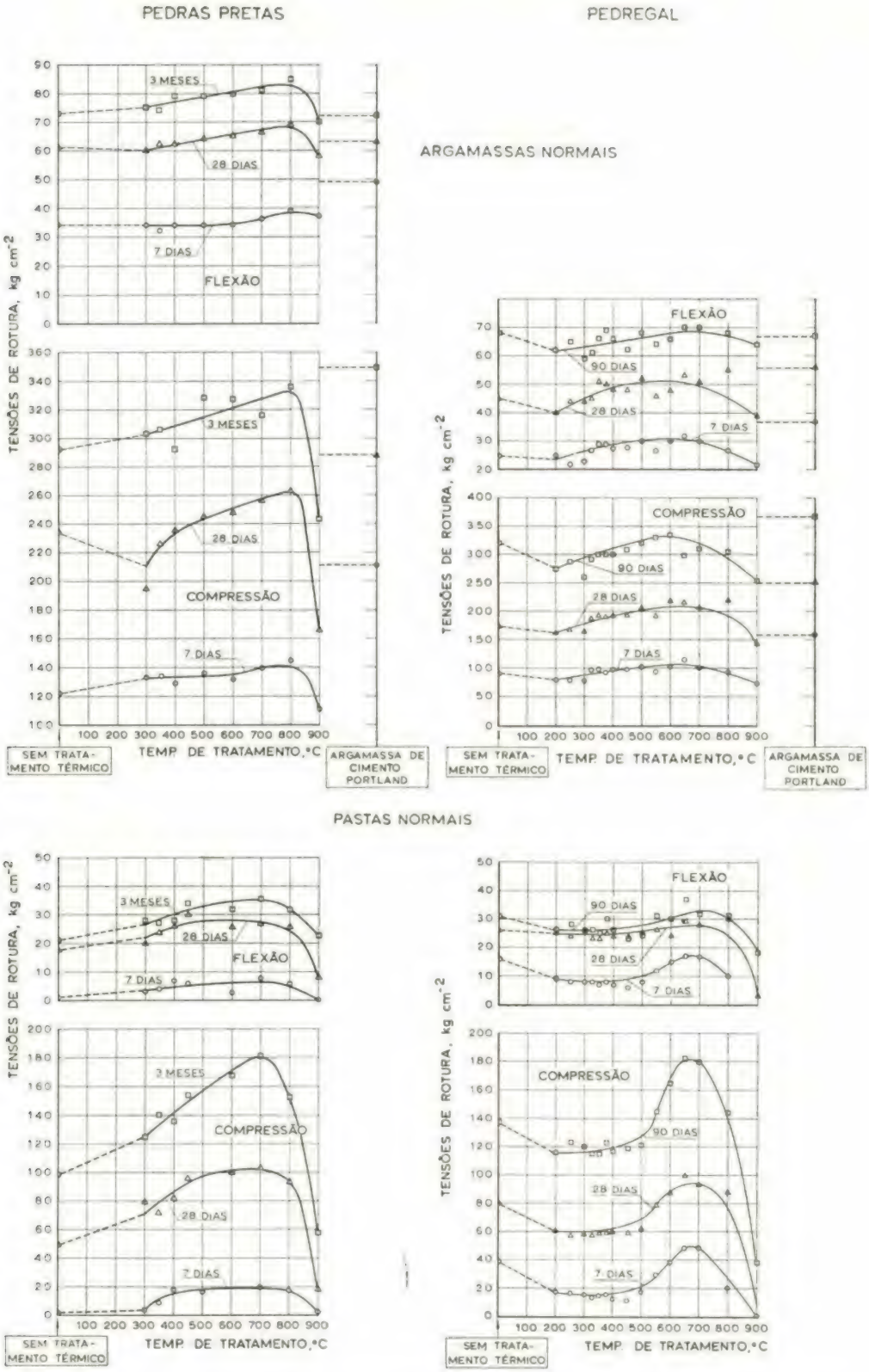


Fig. 4.3 — Pozolanas naturais das Pedras Pretas e do Pedregal — Variação da reactividade, medida pelo ensaio de resistência de argamassas normais de cimento e pozolana e de pastas normais de cal e pozolana, com a temperatura de tratamento.

A fig. 4.2 mostra que a saída de água até aos 350°C provoca um aumento progressivo na reactividade, e, embora a esta temperatura se não note qualquer singularidade na curva da perda de peso (fig. 4.1), a verdade é que se verifica uma perda progressiva da reactividade à medida que a temperatura de tratamento sobe.

Na série de experiências que se está descrevendo levou-se a pozolana até 600°C. Noutra série de experiências realizada posteriormente procurou-se determinar a temperatura a que se verifica, ou se se verifica, a perda de reactividade. Para isso aumentou-se a temperatura de tratamento até 1000°C. A 900°C começou a observar-se um princípio de fusão, e a 1000°C já foi impossível fazer argamassas ou pastas, pois a pozolana fundiu completamente, tendo ficado aderente aos tabuleiros de refractário.

No quadro 4.1 estão indicados os resultados obtidos com a pozolana tratada a 900°C. Como se vê, a queda na reactividade a esta temperatura é importante.

Nos ensaios da pozolana das Pedras Pretas em argamassa normal verifica-se que a temperatura óptima anda à volta de 800°C, e dos ensaios em pasta, que é de 700°C.

A temperatura óptima de reactivação deverá portanto ser da ordem de 750°C. Todavia, o prosseguimento do estudo das propriedades da pozolana das Pedras Pretas reactivada não foi feito com a pozolana tratada a 750°C mas sim a 600°C devido à insuficiência dos ensaios prévios realizados, e que conduziram a este valor. Só mais tarde, depois de feito quase todo o estudo das propriedades da pozolana das Pedras Pretas reactivada se esclareceu melhor, com os ensaios descritos na fig. 4.3, o valor da temperatura óptima da reactivação.

É também curioso observar a queda na reactividade da pozolana quando a temperatura ultrapassa 800°C.

A 1000°C dá-se a fusão de qualquer das pozolanas naturais estudadas mas ensaios realizados com uma porção da das Pedras Pretas fundida que foi possível destacar dos tabuleiros de barro refractário, e moída consequentemente, mostraram que ela ainda possuia uma reactividade muito apreciável. No entanto não nos detivemos no esclarecimento desta questão, apesar do seu elevado interesse para a compreensão do fenómeno da reactivação.

A temperatura óptima de reactivação da pozolana do Pedregal é mal definida nas argamassas mas parece ser da ordem de 600°C. No caso das pastas é mais bem definida: 700°C. Por isso fixámos a temperatura de 650°C como a mais con-

QUADRO 4.1

Reactividade da pozolana de Santo Antão tratada a 900°C

Material ensaiado	Tratamento térmico	Flexão, kg cm^{-2}			Compressão, kg cm^{-2}		
		7 dias	28 dias	3 meses	7 dias	28 dias	3 meses
Argamassa normal de cimento	—	36	56	72	141	241	321
Argamassa normal de 70 % de cimento e 30 % de pozolana	—	32	51	61	140	276	305
	3 h a 340 °C	44	59	68	228	364	421
	3 h a 900 °C	23	40	58	69	142	194
Pasta normal de cal e pozolana	—	27	30	32	112	138	166
	3 h a 340 °C	30	36	36	126	170	177
	3 h a 900 °C	0,2	8	33	3	12	48

veniente para a reactivação da pozolana do Pedregal.

É notável a queda brusca nas propriedades pozolânicas reveladas pelo ensaio em pasta normal de cal quando a temperatura passa de 700°C para 900°C.

5. Influência do tempo de manutenção a temperatura constante. — Um parâmetro que deve influir bastante no grau de reactivação da pozolana natural é certamente a duração do tratamento térmico.

De acordo com o que foi referido (§ 1), o tempo durante o qual o material é exposto a uma temperatura elevada deverá ser o mais curto possível com o fim de evitar a diminuição da instabilidade da estrutura da pozolana, isto é, de evitar, tanto quanto possível, o aumento de energia interna.

Para esclarecer bem qual a influência da grandeza do intervalo de tempo durante o qual se deve ou pode sujeitar a pozolana ao tratamento térmico decidiu-se fazer experiências com a pozolana de Santo Antão, nas quais ela era disposta em camadas de diferentes espessuras, desde 1,5 mm até 15 mm. O material assim disposto era colocado nos tabuleiros refractários e na mufla, prèviamente aquecidos à temperatura de tratamento (340°C). Estudou-se então a influência de durações da actuação da temperatura constante de 340°C desde 5 minutos até 72 horas.

Ao mesmo tempo que se fazia a reactivação procedia-se à determinação da perda de peso, pesando-a ràpidamente à saída da mufla. O arrefecimento foi feito da maneira habitual: arrefecimento rápido, dentro de tabuleiros de alumínio colocados em banho-maria. O intervalo de tempo que mediou entre retirar a pozolana da mufla, pesá-la e colocá-la no tabuleiro frio, era de 2 a 3 minutos. O arrefecimento fazia-se em cerca de 3 a 4 minutos.

Na fig. 5.1 estão indicadas as curvas de variação do peso da pozolana que era introduzida na mufla depois de seca a 100°C, com o tempo de manutenção a temperatura constante. Como se vê, quando a espessura da camada é de 1,5 mm a constância do peso obtém-se após 3 horas.

No caso da pozolana disposta em camadas com 5 mm a constância é obtida pràticamente ao fim de 6 h (embora haja ainda uma perda de 0,1 % de 6 h para 24 h, e de 0,1 % de 24 h para 72 h). Quando a espessura é de 15 mm a constância prática de peso só é obtida ao fim de 24 h, posto que de 24 h para 48 h se tenha ainda determinado uma perda da ordem de 0,1 %, que aliás está dentro dos erros experimentais com que se trabalhou.

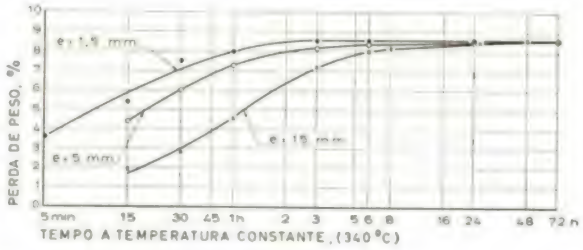


Fig. 5.1 — Pozolana natural de Santo Antão — Variação da perda de peso com a espessura da camada, *e*, e com o tempo de manutenção à temperatura de 340°C.

As tensões de rotura das argamassas e das pastas normais estão indicadas na fig. 5.2.

Os diagramas da variação das tensões de rotura das argamassas normais amassadas com a pozolana reactivada em camadas de 1,5 mm de espessura mostram que o melhor tempo de tratamento anda por 3 horas. O diagrama referente aos ensaios em pasta de cal confirma que as 3 horas de tratamento conduzem ao máximo de reactividade.

As curvas de variação das tensões de rotura das argamassas normais amassadas com a pozolana tratada em camadas com 15 mm indicam que o tempo óptimo de tratamento é da ordem de 8 horas. Considerando os resultados obtidos com o ensaio das pastas normais verifica-se todavia que esta duração é de 4 a 8 horas.

Deve notar-se que a perda de reactividade não é grande quando o intervalo de tempo a temperatura constante aumenta, pelo menos até 72 horas.

Comparados os valores máximos das tensões de rotura das argamassas com a pozolana tratada em camadas de 1,5 mm de espessura com os das argamassas amassadas com a pozolana tratada em camadas de 15 mm verifica-se que as resistências máximas no primeiro caso são iguais na flexão, e mais elevadas na compressão, cerca de 20 % aos 7 dias, 13 % aos 28 dias e 10 % aos 3 meses. Todavia, as resistências das pastas de cal e pozolana mostram o inverso.

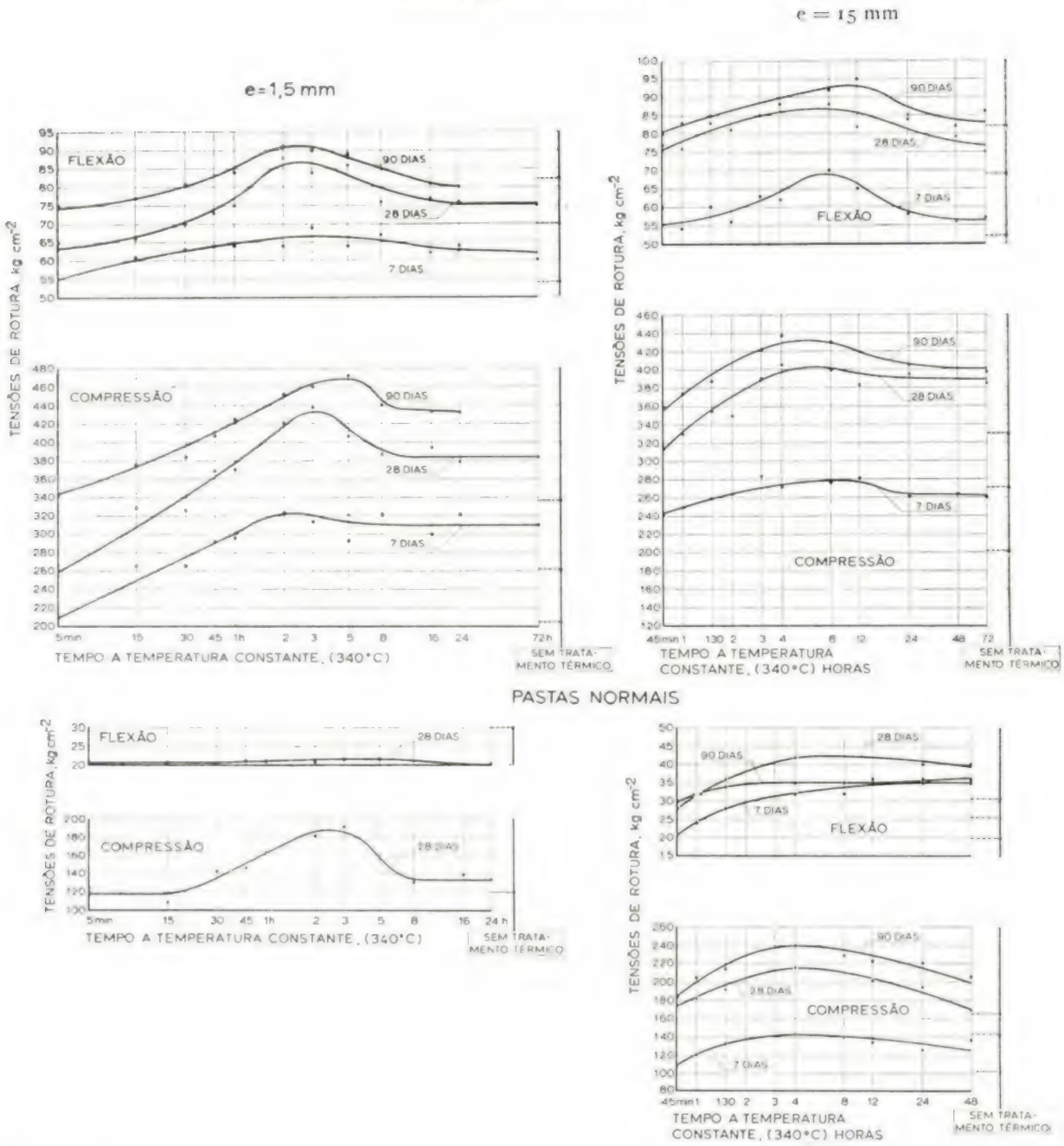


Fig. 5.2 — Pozolana natural de Santo Antão — Variação das tensões de rotura das argamassas e pastas normais com a espessura da camada, e, e com o tempo de manutenção à temperatura de 340°C.

O andamento das curvas das evoluções da resistência e do peso com o tempo que a pozolana é mantida a temperatura constante sugere que estamos em presença de dois fenómenos: por um lado, a desidratação do material que provoca o aumento da reactividade, e, por outro uma ligeira alteração na estrutura que provoca diminuição na reactividade.

Na primeira parte do fenómeno da desidratação, até 2 a 3 horas, quando a pozolana é tratada em camada delgada (1,5 mm) ou até 4 a 8 horas, quando a camada for mais espessa (15 mm) o efeito da saída da água adsorvida é preponderante, mas depois deste intervalo de tempo a alteração da estrutura começa a dominar.

O prolongamento do tempo de acção da temperatura para lá destes períodos produz uma ligeira queda nas tensões de rotura, que se mantém pelo menos até 2 a 3 dias de actuação da temperatura constante, o que significa que a subsequente alteração da estrutura não é grande porque as reactividades ficam inalteradas, e, o que é notável, com um valor ainda bastante superior à reactividade inicial.

Daqui se deduz que a velocidade de aquecimento, ou melhor, com que se faz a desidratação inicial deve, de facto, ter a sua importância. O nosso aquecimento em camadas muito delgadas está mais próximo do aquecimento em regime dinâmico, ou seja, com agitação do material, do que o aquecimento em camada espessa, pois o primeiro tratamento é superior ao segundo.

Se o aquecimento se fizer em regime dinâmico, conforme insiste o prof. F. Ferrari (§ 2), com uma velocidade elevada, de modo a permitir não só o rápido aquecimento de todo o material mas também a facilitar a saída das moléculas de água adsorvidas, obter-se-á o mínimo de alteração da estrutura, que diminui a reactividade, e os resultados deverão ser bastante melhores do que os encontrados neste trabalho.

A influência do tempo de actuação da temperatura a 600°C sobre a reactividade da pozolana das Pedras Pretas foi estudada com o material disposto em camadas com 6 mm de espessura e os resultados dos ensaios realizados estão indicados na fig. 5.3. Estes diagramas mostram que a duração do tempo de tratamento para cima de 7 horas deverá restabelecer a reactividade inicial. A melhor duração do tratamento é de, aproximadamente, 2 horas.

Quanto à pozolana do Pedregal, os resultados dos ensaios realizados à temperatura de 650°C com o material disposto em camadas com as espessuras de 1 mm e de 12 mm estão indicados na fig. 5.4.

As experiências mostram um aumento na reactividade ao fim de 15 a 30 minutos de tratamento da pozolana disposta em camadas com 1 mm de espessura, e, apesar da dispersão, o prolongamento do período de tratamento não parece diminuir a reactividade alcançada.

Esta conclusão é confirmada pela série de experiências em que, com a pozolana disposta em camadas com 12 mm de espessura, se prolongou o tempo de tratamento até 4 horas. Observa-se que a reactividade cresce até intervalos de tempo de 1 a 2 horas, apesar da dispersão ter sido também anormalmente elevada. Tal como no caso da pozolana das Pedras Pretas, o aumento da reactividade não é importante.

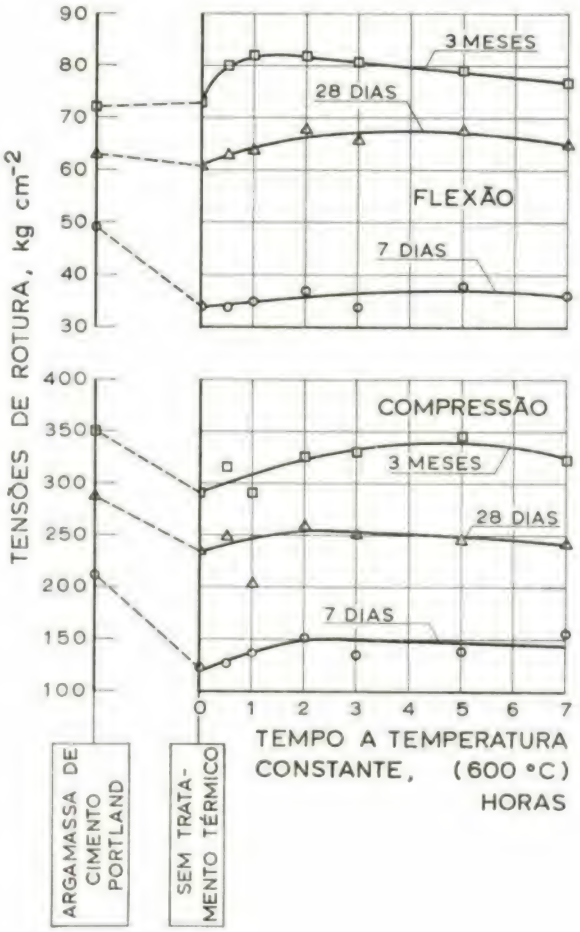


Fig. 5.3 — Pozolana natural das Pedras Pretas — Variação das tensões de rotura das argamassas normais de cimento e pozolana com o tempo de manutenção à temperatura de 600°C (em camadas com 6 mm de espessura)

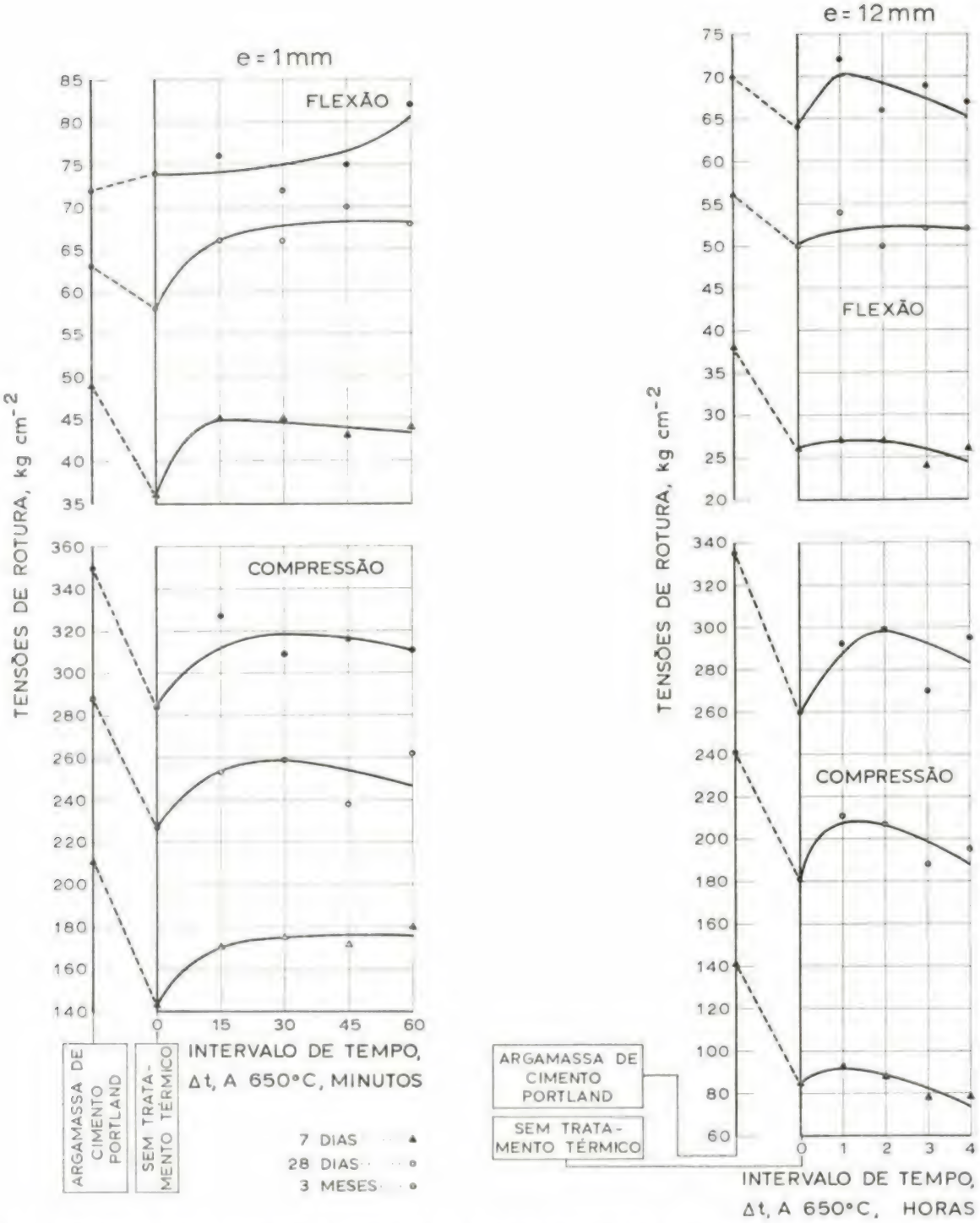


Fig. 5.4 — Pozolana natural do Pedregal — Variação das tensões de rotura das argamassas normais de cimento e pozolana com a espessura da camada, *e*, e com o tempo de manutenção à temperatura de 650° C.

6. Influência do modo de arrefecimento da pozolana de Santo Antão

6.1. Velocidade de arrefecimento ao ar livre. — Depois de estudada a influência do modo de aquecimento da pozolana torna-se necessário determinar a maneira de proceder ao arrefecimento. A sua rapidez que, segundo o prof. Ferrari, é também importante no processo de tratamento poderá, à primeira vista, provocar uma congelação, digamos assim, da estrutura interna da pozolana que teria sido alterada pela acção da

temperatura, tal como acontece com os metais que são susceptíveis de têmpera. Se a razão do aumento da reactividade da pozolana tratada tèrmicamente é esta, então a velocidade de arrefecimento deverá ter uma importância fundamental. Para estudar este parâmetro começou-se por fazer experiências com a pozolana de Santo Antão.

Depois de submetida a aquecimento durante 1 h a 380°C em camadas com 5 mm de espessura, foi arrefecida até à temperatura ambiente em intervalos de tempo de 5 minutos (pozolana colocada dentro de tabuleiros, em banho-maria, com água fria — § 2), de 1 hora, de 2 horas e de 4 horas. Todos os arrefecimentos foram realizados com a pozolana em contacto com o ar, e nos três últimos intervalos de tempo o arrefecimento foi feito dentro da mufla, procurando-se que a temperatura baixasse linearmente no tempo, o que foi conseguido regulando a abertura da porta.

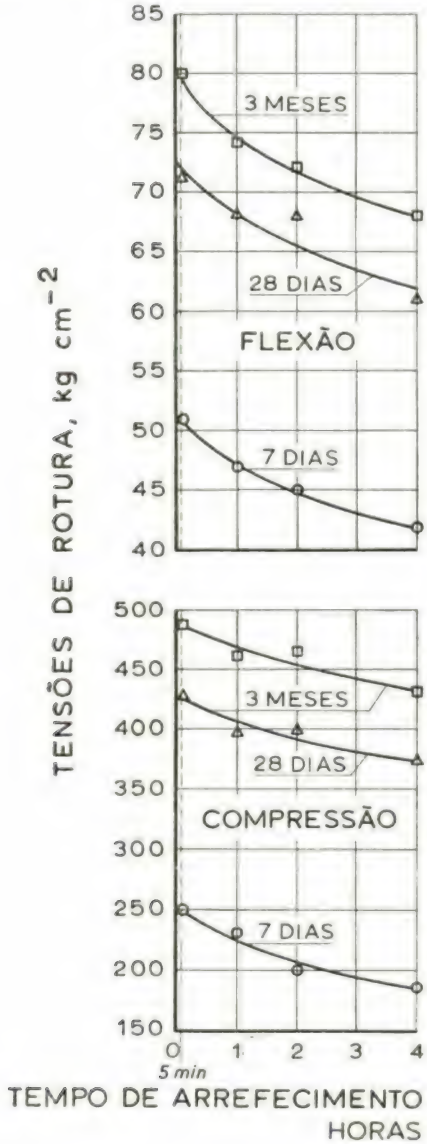


Fig. 6.1 — Pozolana natural de Santo Antão — Variação das tensões de rotura das argamassas normais de cimento e pozolana aquecida a 380°C durante 1 hora, em camadas com 5 mm de espessura, com o tempo de arrefecimento ao ar livre.

As resistências das argamassas normais amassadas com a pozolana assim preparada estão indicadas na fig. 6.1.

Estes diagramas mostram a enorme influência da velocidade do arrefecimento, pois à medida que aumenta o intervalo de tempo para atingir a temperatura ordinária, a resistência conferida pela pozolana tratada às argamassas diminui.

As experiências descritas no parágrafo anterior sobre a influência do tempo e da espessura da camada na reactividade da pozolana de Santo Antão levam a pensar que não haja qualquer alteração na estrutura, já de si instável, da pozolana, provocada pela acção de temperaturas tão baixas como as de 350 a 400°C, actuando durante tão curto intervalo de tempo (1 h).

Antes de vermos como podem ser explicados estes factos, vamos descrever mais uma experiência a que chamaremos «envelhecimento da pozolana reactivada».

6.2. Envelhecimento da pozolana reactivada. — Durante a realização do trabalho que estamos descrevendo observou-se um facto extremamente curioso: a pozolana de Santo Antão depois de tratada aumentava progressivamente de peso quando deixada ao ar livre.

Partindo do conhecimento de todos os factos descritos procedeu-se então à seguinte série de experiências. Dividiu-se uma dada amostra de pozolana tratada tèrmicamente em duas partes, cada uma das quais foi conservada em meios diferentes: uma dentro de frascos de vidro de rolha esmerilada e parafinada, logo após o arrefecimento rápido, e outra ao ar livre, em camada com cerca de 15 mm de espessura, dentro de um tabuleiro, colocado numa sala do laboratório onde a higrometria era variável, mas da ordem de 70 a 80 % de humidade relativa.

Com amostras desta pozolana reactivada com diferentes idades de conservação nos dois ambientes foram amassadas argamassas de cimento e pozolana.

As tensões de rotura medidas estão indicadas na fig. 6.2. No caso da conservação ao ar da pozolana tratada observa-se que ela vai perdendo a sua reactividade até ao nível da da pozolana sem tratamento térmico.

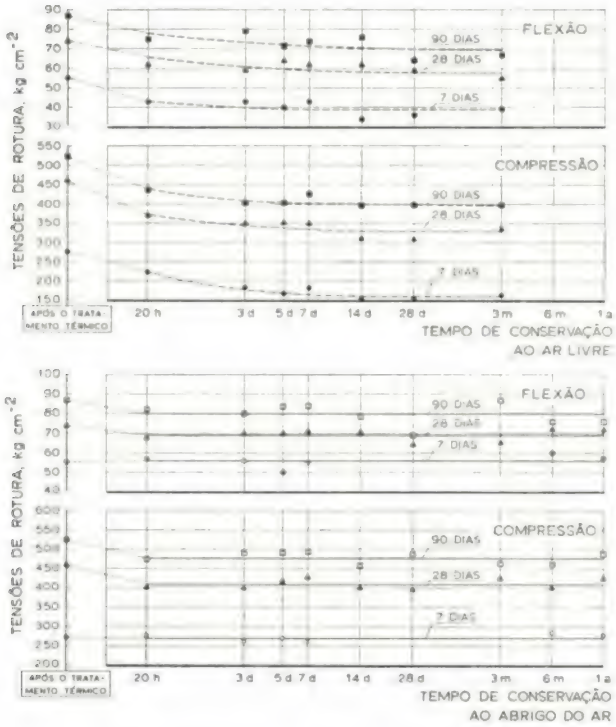


Fig. 6.2 — Pozolana natural de Santo Antão — Variação das tensões de rotura das argamassas normais de cimento e pozolana reactivada com o tempo de conservação desta ao ar livre e ao abrigo do ar.

Pelo contrário, quando a pozolana reactivada tèrmicamente é conservada ao abrigo do ar a sua reactividade mantém-se.

Com a manipulação necessária ao engarrafamento das amostras houve uma ligeira absorção de humidade atmosférica o que, como veremos mais à frente, fez baixar um pouco a reactividade, mas, embora a dispersão seja um tanto elevada, não há dúvida que a conservação da pozolana ao abrigo do ar lhe mantém as propriedades indefinidamente (pelo menos até 1 ano, que é o maior período de conservação agora existente).

Como se disse mais acima, durante este trabalho observou-se um facto extremamente importante: a amostra da pozolana tratada tèrmicamente e conservada ao ar livre ia aumentando, gradualmente, de peso, até atingir uma certa constância. Este fenómeno foi atribuído à absorção de humidade pela pozolana reactivada.

6.3. Causas do fenómeno da reactivação e do envelhecimento da pozolana reactivada. — O fenómeno da perda de água durante o aquecimento e o da absorção de humidade por exposição ao ar teve então de ser bem esclarecido com outras experiências, em que se determinou o grau de reversibilidade da perda de peso e da absorção de humidade.

A partir de um dado estado inicial (em equilíbrio com uma atmosfera de 73 % de humidade relativa, a 20°C), sujeitou-se uma amostra de pozolana a temperaturas crescentes, desde a ambiente até 900°C. Depois de mantida a cada uma destas temperaturas durante 1 h, em camada com 3 mm de espessura, determinou-se, por pesagem no ar a essa temparatura, a respectiva perda de peso. Em seguida foi ràpidamente arrefecida e colocada no mesmo ambiente inicial (73 % de humidade relativa a 20°C) disposta em camada fina, com 2 a 3 mm de espessura, até peso constante, o que se verificou ao fim de 2 a 4 dias.

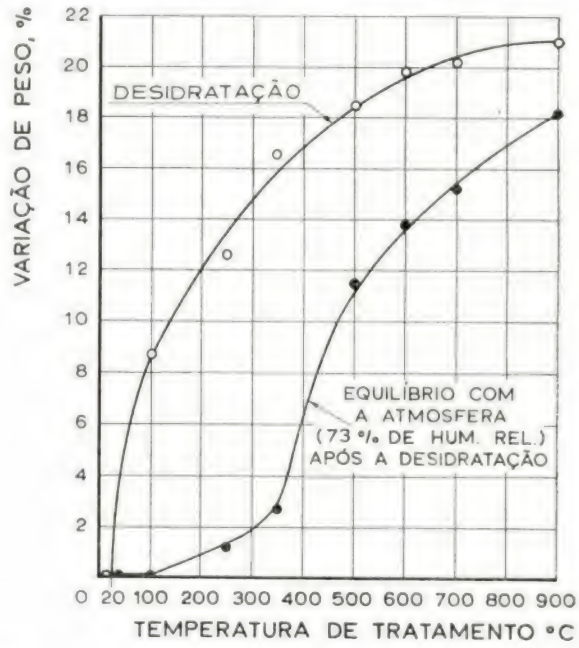
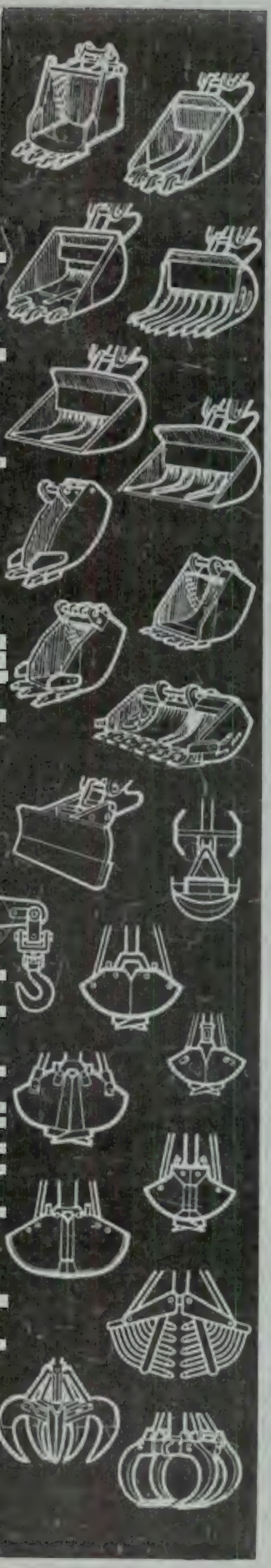


Fig. 6.3 — Pozolana natural de Santo Antão — Diagrama da perda de peso com a temperatura (desidratação) e da perda de peso final após o equilíbrio com a atmosfera de 73 % de humidade relativa a 20°C.

Na fig. 6.3 estão indicadas a curva da perda de peso em virtude da sujeição às diversas temperaturas (indicada por «desidratação»), referida ao peso da amostra em equilíbrio com a atmosfera de 73 % de humidade e 20°C de temperatura,



Poclain T.Y. 45

Escavadora-Retro Escavadora-Grua

- POTÊNCIA AUMENTADA
- ROTAÇÃO TOTAL E CONTÍNUA
- ESTABILIDADE 100 %
- 20 BALDES DIFERENTES

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS

Sociedade de Mecanização Industrial e Agrícola, S. A. R. L.
Avenida Padre Manuel da Nóbrega, 8-B-1.º — LISBOA
Telefone: 72 40 53/4/5

SMEIA

INDUSTRIAIS TEXTEIS

PARA OS VOSSOS MANCHONS, FLANELAS, TRANSPORTADORES,
E TODOS OS TECIDOS TÉCNICOS

EM FIBRAS NATURAIS OU SINTÉTICAS

Consultem:

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

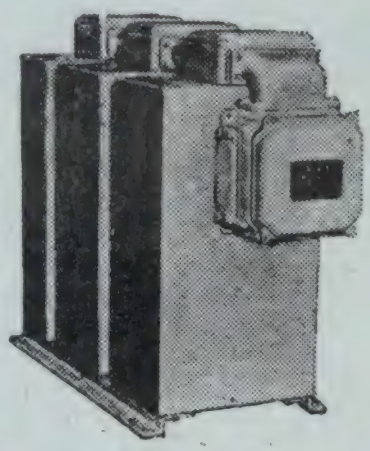
APART.: 9
TELEF.: 52093-52094
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

CONDENSADORES **ASEA**

PARA MELHORAMENTO DO FACTOR DE POTÊNCIA



Bateria de condensadores tipo CLB, 32 kVAr

- SE PAGA POR CONSUMO DE ENERGIA REACTIVA...
- SE A SUA INSTALAÇÃO ELÉCTRICA ESTÁ SOBRECARREGADA...

...consulte:

ASEA ELÉCTRICA L.DA

SEDE EM LISBOA
R. DE ARTILHARIA UM, 104, 4.º-D.º
Telefone P.P.C. — 68 90 17/8/9

END. TELEG.
ASEAPORT

FILIAL NO PORTO
R. DO CAMPO ALEGRE, 144
Telefone P.P.C. — 6 21 06/7

e a curva de variação do peso final da amostra, após o tratamento térmico e depois de voltar ao equilíbrio com a atmosfera inicial. Esta última curva representa portanto a diferença entre o peso final da amostra após a sujeição a uma determinada temperatura e o equilíbrio com a atmosfera inicial, e o peso inicial.

O diagrama mostra que só há reversibilidade perfeita até 100°C. Desde esta temperatura até cerca de 350°C a água perdida, isto é, não recuperável, atinge um valor de cerca de 2,5 %. Acima desta temperatura e até 500°C, a água perdida, e não recuperável, aumenta ràpidamente atingindo cerca de 11 % e cresce depois mais lentamente, de modo que para as altas temperaturas, de cerca de 900°C, quase toda a água perdida é irrecuperável.

A diferença entre as ordenadas destas duas curvas dá portanto a quantidade de água que é adsorvida pelos grãos (fig. 6.4). Esta curva mostra que, efectivamente, o máximo se dá a 350°C, temperatura que se verificou conduzir ao máximo de reactividade (fig. 4.2).

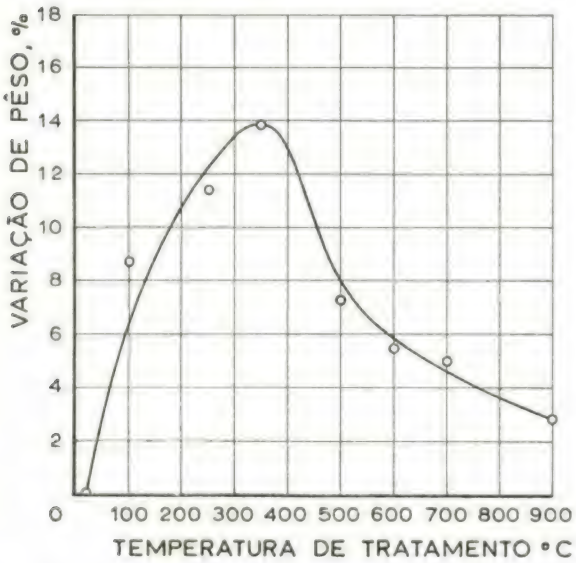


Fig. 6.4 — Pozolana natural de Santo Antão — Diagrama da variação de peso (absorção de humidade) em função da temperatura de tratamento, após o equilíbrio com a atmosfera inicial (73 % de humidade relativa a 20°C).

6.4. Arrefecimento ao ar e ao abrigo do ar. — A interpretação dos fenómenos descritos leva agora fàcilmente à conclusão que o aquecimento tem por efeito expulsar moléculas de água do interior do material, e o arrefecimento e subsequente conservação da pozolana deverão ser feitos de ta modo que *não haja absorção de humidade.*

Esta asserção é provada com a experiência seguinte, em que, após o aquecimento duma dada porção de pozolana natural de Santo Antão a 340°C durante 3 h, se arrefeceram três partes desta amostra de diferentes maneiras.

Uma parte foi arrefecida ràpidamente em contacto com o ar, em tabuleiros de alumínio colocados em banho-maria de água fria (arrefecimento em cerca de 2 a 3 minutos), como tem sido referido até aqui.

Outra parte foi também sujeita a arrefecimento rápido, mas ao abrigo do ar, em tabuleiros de alumínio colocados em banho-maria de água fria tapados hermèticamente logo a seguir à colocação da pozolana, e portanto sem acesso de ar.

A terceira parte arrefeceu-se com muita lentidão dentro de um depósito metálico, também hermèticamente vedado e conservado dentro da mufla, cuja temperatura baixou de 24°C por hora nas primeiras 6 horas e depois cerca de 9°C por hora, desde 200°C até à temperatura ambiente. O arrefecimento demorou assim cerca de 24 horas.

Não se reconheceu vantagem em fazer o arrefecimento lento em contacto com o ar pois os resultados indicados na fig. 6.1 são bastante claros: diminuição progressiva da reactividade à medida que o tempo de arrefecimento em contacto com o ar aumenta.

Logo que a pozolana atingiu a temperatura ordinária foram amassadas as argamassas normais e as pastas normais de cal, cujas tensões de rotura estão indicadas no quadro 6.1. A observação dos valores inscritos neste quadro indica que o melhor tipo de arrefecimento é feito ràpidamente, ao abrigo do ar; em seguida classifica-se o arrefecimento lento ao abrigo do ar e em último lugar o arrefecimento rápido em contacto com o ar (resultados obtidos com as argamassas). Deve todavia notar-se que, dadas as dispersões normalmente obtidas, as diferenças não são acusadas, pois o resultado que mais influi na classificação do arrefecimento rápido ao abrigo do ar em primeiro lugar é o obtido em compressão a 3 meses, que acusa uma dispersão notável.

As resistências dos prismas de pasta de cal não concordam bem com as dos prismas de argamassa, como aliás já se tem notado ao longo deste trabalho.

É importante frizar que não há uma diferença

QUADRO 6.1

Influência do arrefecimento ao ar e ao abrigo do ar da pozolana de Santo Antão tratada tèrmicamente

Material ensaiado	Ligante e tipo de arefecimento da pozolana	Flexão, kg cm^{-2}			Compressão, kg cm^{-2}		
		7 dias	28 dias	3 meses	7 dias	28 dias	3 meses
Argamassa normal de cimento	Cimento	50	67	73	267	360	438
Argamassa normal de 70 % de cimento e 30 % de pozolana	Pozolana não tratada	45	64	68	257	396	433
	Arrefecida ràpidamente em contacto com o ar	63	73	82	370	523	524
	Arrefecida ràpidamente ao abrigo do ar	61	80	85	374	541	613
	Arrefecida lentamente ao abrigo do ar	60	74	82	375	552	569
Pasta normal de cal	Pozolana não tratada	26	34	28	133	163	187
	Arrefecida ràpidamente em contacto com o ar	42	45	31	184	198	246
	Arrefecida ràpidamente ao abrigo do ar	30	34	27	146	187	219
	Arrefecida lentamente ao abrigo do ar	—	38	25	179	225	262

sensível entre o arrefecimente lento ao abrigo do ar, e o arrefecimento rápido. A velocidade de arrefecimento não é pois um parâmetro fundamental no tratamento térmico da pozolana natural de Santo Antão. O essencial é que, durante o arrefecimento, a pozolana não adsorva moléculas de água e para isso basta deixá-la arrefecer em recipiente fechado.

Deve ainda notar-se o facto já observado de que a pozolana, arrefecida ao ar com lentidão, ou estando reactivada, depois de exposta ao ar durante um período suficiente, readquire, pouco mais ou menos, a reactividade que tinha antes de sujeita ao aquecimento.

Todos os fenómenos que descrevemos provam portanto que o *aumento da reactividade da pozolana de Santo Antão por meio do tratamento térmico não é devido a alteração na sua estrutura mas à saída de água que não tem ligações covalentes: a ligação da água à estrutura é fàcilmente restabelecível, e portanto só pode ser devida a forças de adsorção.*

A causa do aumento da reactividade da pozolana reside não no facto de haver «congelação» da sua estrutura, que teria sido alterada pela acção da temperatura, mas de outro facto, que deve ser atribuído ao aumento da reactividade da superfície do grão de pozolana devido à libertação das forças de adsorção da superfície, inicialmente saturadas pelas ligações às moléculas de água.

7. Influência do modo de arrefecimento das pozolanas das Pedras Pretas e do Pedregal

7.1. Arrefecimento ao ar e ao abrigo do ar. — Segundo o que acabámos de observar há dois fenómenos em jogo na reactivação da pozolana natural: libertação da superfície do grão da pozolana de moléculas de água, o que aumenta a reactividade desta superfície (caso da pozolana natural de Santo Antão) e reajustamento das ligações entre os átomos do material, que altera a sua energia interna (caso referido por Turriziani, § 1).

Ao estudar o sistema de arrefecimento das

QUADRO 7.1

Influência do tipo de arrefecimento na reactividade das pozolanas das Pedras Pretas e do Pedregal

Material ensaiado	Ligante e tipo de arrefecimento da pozolana	Pedras Pretas								Pedregal							
		Flexão, kg cm^{-2}			Compressão, kg cm^{-2}			Coeficientes de resistência		Flexão, kg cm^{-2}			Compressão, kg cm^{-2}			Coeficientes de resistência	
		7 d	28 d	3 m	7 d	28 d	3 m	Flexão	Compressão	7 d	28 d	3 m	7 d	28 d	3 m	Flexão	Compressão
Argamassa normal de cimento portland	Cimento portland	49	63	72	211	288	349	—	—	41	61	66	160	258	366	—	—
Argamassa normal de 70 % de cimento e 30 % de pozolana	Pozolana não reactivada	36	65	71	118	222	292	171	632	27	47	64	93	172	276	138	541
	Arrefecida ràpidamente ao abrigo do ar	37	64	84	128	251	326	185	705	—	—	—	—	—	—	—	—
	Arrefecida ràpidamente em contacto com o ar	37	71	84	145	263	310	192	718	32	53	70	114	214	303	155	631
	Arrefecida lentamente ao abrigo do ar	38	70	87	133	257	306	195	696	32	55	71	121	220	307	158	648
	Arrefecida lentamente em contacto com o ar	37	64	86	124	238	314	187	676	33	56	72	118	220	305	161	643
Pasta normal de cal e pozolana	Pozolana não reactivada	1	16	20	1	45	90	37	136	14	23	30	34	71	134	67	239
	Arrefecida ràpidamente ao abrigo do ar	4	24	28	9	86	133	56	228	—	—	—	—	—	—	—	—
	Arrefecida ràpidamente em contacto com o ar	4	27	31	10	92	153	62	255	17	29	37	49	100	183	83	332
	Arrefecida lentamente ao abrigo do ar	4	23	25	11	93	149	52	253	22	36	35	65	118	171	93	354
	Arrefecida lentamente em contacto com o ar	3	24	26	6	74	131	53	211	21	32	36	54	113	172	89	339

pozolanas das Pedras Pretas e do Pedregal procurou-se então determinar qual destes princípios lhes seria aplicável: arrefecimento rápido ou arrefecimento lento, ao abrigo do ar ou em contacto com o ar.

No quadro 7.1 estão registadas as tensões de rotura das argamassas normais de cimento e pozolana natural das Pedras Pretas e do Pedregal e das pastas normais de cal e destas pozolanas aquecidas a 600°C e a 650°C respectivamente e arrefecidas depois segundo estes quatro processos.

Com o fim de atenuar a influência da dispersão dos resultados, no quadro referido estão indicados os valores dos chamados «coeficientes de resistência». Estes coeficientes de resistência, de utilização por vezes cómoda para comparar valores correspondentes a um parâmetro que os diferencia pouco, são obtidos pela soma das tensões de rotura em todas as idades de ensaio a comparação dos seus valores só tem sentido quando as idades são rigorosamente iguais em todas as somas comparadas.

Como se observa, o modo de arrefecimento não tem grande importância.

Apesar de as diferenças estarem dentro dos erros experimentais verifica-se, no caso da pozolana das Pedras Pretas, que parece haver uma tendência para o arrefecimento rápido (ao ar ou ao abrigo do ar) ser superior ao arrefecimento lento. Para a pozolana do Pedregal há um leve indício de que o arrefecimento ao abrigo do ar, embora feito lentamente, conduz ao melhor resultado.

Deve observar-se a considerável diferença de comportamento entre estes materiais e a pozolana natural de Santo Antão; é evidente que naqueles não intervém pràticamente o mecanismo do aumento da reactividade da superfície dos grãos pela libertação das forças de adsorção.

7.2. Envelhecimento das pozolanas das Pedras Pretas e do Pedregal reactivadas. — Tal como no caso da de Santo Antão, uma porção de pozolana das Pedras Pretas convenientemente reactivada por aquecimento a 600°C durante 2 h e arrefecida ràpidamente ao ar e outra porção de pozolana do Pedregal aquecida a 650°C durante 3 horas seguidas por arrefecimento ao abrigo do ar, foram divididas em duas partes: uma conservou-se ao ar livre, numa sala do laboratório, e outra ao abrigo do ar, dentro de frascos rolhados e parafinados.

Ao fim de determinados intervalos de tempo, desde o instante em que a pozolana arrefeceu até 1 ano após o arrefecimento, mediram-se as tensões de rotura dos prismas de argamassa e de pasta normal amassadas com estas amostras de pozolana, cujos valores estão indicados nos quadros 7.2 e 7.3. Com o fim de tornar mais simples a apreciação dos resultados, nas duas últimas colunas dos ensaios em argamassa e em pasta normal figuram os «coeficientes de resistência» (soma das tensões de rotura a 7 dias, 28 dias e 3 meses).

Apesar da dispersão, os resultados dos ensaios realizados com a pozolana das Pedras Pretas reactivada mostram que esta, conservada ao abrigo do ar, mantém, uma reactividade sistemàticamente superior, mas a conservada ao ar livre não chega, mesmo ao fim de 1 ano, a readquirir a reactividade que tinha antes do tratamento.

Considerando os ensaios em argamassa normal da pozolana do Pedregal reactivada observa-se que esta não mostra tendência para uma diminuição progressiva da reactividade com o tempo de conservação, quer ao ar livre quer ao abrigo do ar. Todavia, nota-se diminuição gradual da reactividade nos ensaios das pastas normais. Mas deve frisar-se que o comportamento da pozolana do Pedregal reactivada, conservada quer ao abrigo do ar quer em contacto com o ar, é idêntico.

Verifica-se portanto que, se há uma perda progressiva da reactividade da pozolana do Pedregal reactivada ela não pode ser devida à adsorção de humidade.

Em conclusão, as pozolanas das Pedras Pretas e do Pedregal reactivadas não perdem as suas propriedades pela exposição ao ar, como a de Santo Antão. Este é mais um facto que prova a diferença entre o mecanismo da reactivação destas pozolanas.

7.3. Causas do fenómeno da reactivação. — Sujeitaram-se amostras destas pozolanas, inicialmente em equilíbrio com uma atmosfera de 73 % de humidade relativa a 20°C, a temperaturas crescentes; determinou-se a perda de peso total a estas temperaturas (desidratação) e, depois de readquirido o equilíbrio com a atmosfera ini-

QUADRO 7.2

Ensaios de envelhecimento da pozolana das Pedras Pretas tratada durante 2 h a 600°C e arrefecida ràpidamente ao ar

Ligante		Argamassa normal de 70 % de cimento portland com 30 % de pozolana								Pasta normal de cal e pozolana							
		Flexão, kg cm^{-2}			Compressão, kg cm^{-2}			Coeficientes de resistência		Flexão, kg cm^{-2}			Compressão, kg cm^{-2}			Coeficientes de resistência	
		7 d	28 d	3 m	7 d	28 d	3 m	Flexão	Compressão	7 d	28 d	3 m	7 d	28 d	3 m	Flexão	Compressão
Cimento portland		49	64	70	46	307	277	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pozolana não reactivada		34	61	73	122	234	292	168	648	1	18	21	2	50	99	40	151
Pozolana acabada de reactivar		37	64	80	145	241	329	181	715	5	26	29	13	81	162	60	256
Pozolana reactivada e conservada ao abrigo do ar durante	24 h	37	60	80	155	240	331	177	726	3	26	28	8	66	126	57	200
	3 d	38	64	79	155	256	368	181	779	5	30	32	12	81	149	67	242
	7 d	42	67	85	161	268	332	194	761	7	27	28	12	71	152	62	235
	28 d	41	62	83	148	244	362	186	754	5	26	26	11	76	138	57	225
	3 m	44	66	88	172	276	385	198	833	8	30	32	14	100	184	70	298
	1 ano	39	66	89	136	248	375	194	759	8	26	33	17	81	139	67	237
Pozolana reactivada e conservada ao ar livre durante	3 d	39	63	79	129	232	322	181	683	4	26	24	7	57	109	54	173
	7 d	38	66	80	146	246	320	184	712	4	25	24	8	63	124	53	195
	28 d	41	60	84	144	238	351	185	733	3	23	26	6	52	101	52	158
	3 m	41	66	83	154	270	366	190	790	6	24	29	7	71	136	59	214
	1 ano	35	65	79	131	245	339	179	715	3	27	30	10	62	139	60	211

QUADRO 7.3

*Ensaios de envelhecimento da pozolana do Pedregal * tratada durante 3 h a 650°C e arrefecida ao abrigo do ar*

Ligante		Argamassa normal de 70 % de cimento portland com 30 % de pozolana								Pasta normal de cal e pozolana							
		Flexão, kg cm−2			Compressão, kg cm−2			Coeficientes de resistência		Flexão, kg cm−2			Compressão, kg cm−2			Coeficientes de resistência	
		7 d	28 d	3 m	7 d	28 d	3 m	Flexão	Compressão	7 d	28 d	3 m	7 d	28 d	3 m	Flexão	Compressão
Cimento portland		38	56	70	141	241	335	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pozolana não reactivada		26	49	65	85	181	261	140	527	19	26	31	45	82	143	76	270
Pozolana acabada de reactivar		30	51	66	96	205	273	147	574	29	42	51	89	155	174	125	418
Pozolana reactivada e conservada ao abrigo do ar durante	24 h	35	51	66	104	200	289	152	593	26	41	46	84	132	174	113	390
	48 h	34	55	65	134	214	291	154	639	28	36	43	79	126	176	107	381
	3 d	30	50	70	95	190	281	150	566	26	36	46	65	149	181	108	395
	7 d	33	56	74	114	210	288	163	612	24	33	37	68	127	176	94	371
	28 d	33	50	66	124	191	274	149	589	25	38	42	77	122	188	105	387
	3 m	33	46	62	97	177	278	141	552	19	25	37	53	99	174	81	326
	1 ano	31	60	69	105	195	272	160	572	16	29	37	48	99	155	82	302
Pozolana reactivada e conservada ao ar livre durante	24 h	31	50	65	124	197	250	146	571	30	42	51	89	155	174	114	380
	48 h	32	53	68	125	216	291	153	632	25	39	43	89	126	167	107	382
	3 d	30	49	65	118	204	284	152	638	21	34	40	73	118	155	95	346
	7 d	32	56	71	118	203	285	159	606	22	36	44	68	113	160	102	341
	28 d	31	55	65	116	212	280	151	608	22	36	40	65	114	159	98	338
	3 m	33	53	68	128	218	286	154	632	20	33	33	52	106	162	86	320

* A superfície específica da pozolana empregada nestes ensaios era de 4500 cm^2g^{-1} determinada pelo método de Blaine.

cial, a diferença de peso em relação ao peso da amostra no primeiro estado, antes do aquecimento (fig. 7.1). A diferença entre as ordenadas destas duas curvas (de desidratação e de equilíbrio) dá a absorção da humidade atmosférica da pozolana tratada às diferentes temperaturas (fig. 7.2).

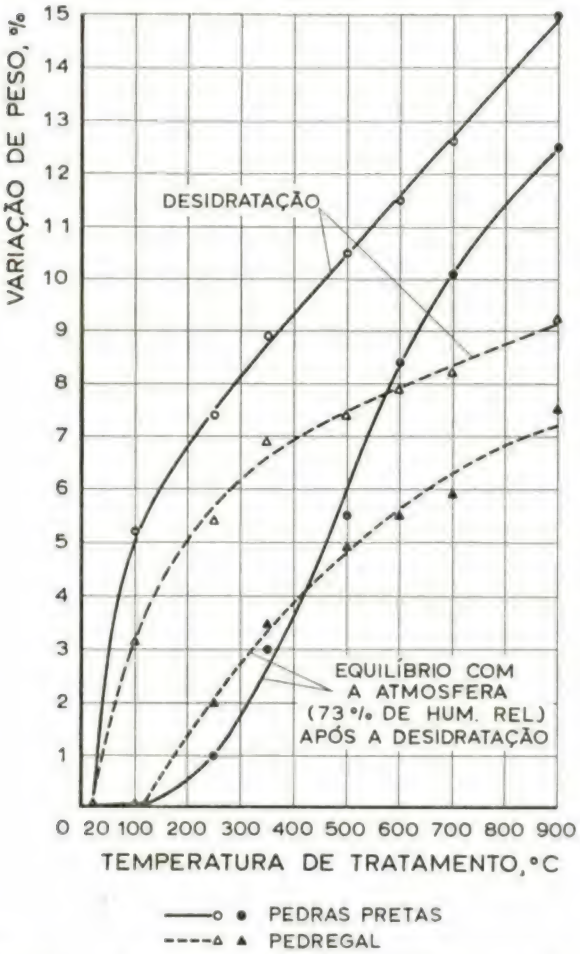


Fig. 7.1 — Pozolanas naturais das Pedras Pretas e do Pedregal — Diagramas da perda de peso com a temperatura (desidratação) e da perda de peso final após o equilíbrio com a atmosfera de 73 % de humidade relativa a 20°C.

Os diagramas obtidos para a pozolana das Pedras Pretas mostram que o máximo de absorção (cerca de 6,5 %) se dá por volta de 250°C, e não de 350°C, como no caso da de Santo Antão, nem por volta dos 700° – 800°C que é a temperatura em que a reactivação é maior (§ 4). Pode-se pois afirmar que a reactivação da pozolana das Pedras Pretas deve ser essencialmente devida à saída da água de constituição, com ligações covalentes à estrutura. O mecanismo da sua reactivação deve portanto estar relacio-

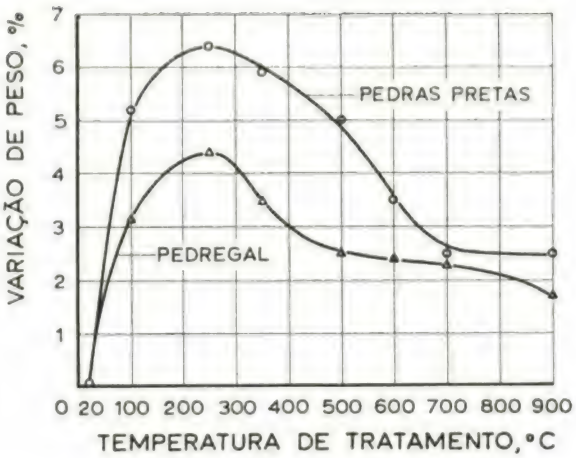


Fig. 7.2 — Pozolanas naturais das Pedras Pretas e do Pedregal — Diagramas da variação de peso (absorção de humidade) em função da temperatura de tratamento, após o equilíbrio com a atmosfera inicial (73 % de humidade relativa a 20°C).

nado com o da formação da pozolana artificial, e a causa da reactivação poderá residir na argila que a pozolana originàriamente contenha, e que se transforma em pozolana artificial por aquecimento.

Todavia, é conveniente notar que a perda de reactividade, embora pequena, da pozolana das Pedras Pretas reactivada quando conservada ao ar livre, e a absorção relativamente grande, em comparação com a do Pedregal (fig. 7.2) como veremos a seguir, sugerem que o mecanismo de adsorção das moléculas de água da superfície do grão da pozolana tenha também uma certa influência na reactivação.

Quanto à pozolana do Pedregal, a curva de variação do peso da água adsorvida entre a temperatura de tratamento e o equilíbrio final com a atmosfera (fig. 7.2) mostra um máximo por volta de 250°C tal como no caso da das Pedras Pretas, não se notando também qualquer singularidade entre 500 e 800°C, que é a zona em que este material adquire a reactividade máxima. Não há pois paralelismo entre as curvas das figs. 4.3, 7.1 e 7.2.

Por outro lado, a perda de reactividade que se manifesta após o tratamento, embora só detectável nos ensaios em pasta de cal, leva a pensar que talvez haja também uma ligeira alteração na estrutura da pozolana, que após tratamento térmico tende a readquirir o estado inicial à medida que o tempo passa. Este fenómeno, embora

pouco acusado, tanto se passa na pozolana reactivada conservada ao ar livre como na conservada ao abrigo do ar.

Contudo, havendo uma certa contribuição da instabilidade da estrutura para a reactivação da pozolana será natural pensar-se que a velocidade de arrefecimento deveria ter uma influência bastante maior do que a observada (quadro 7.1).

O mecanismo essencial da reactivação destas duas pozolanas é portanto idêntico: parece ser devido principalmente à transformação da argila em pozolana. Na das Pedras Pretas deve haver uma ligeira contribuição da desorção das moléculas de água da superfície do grão, e na do Pedregal talvez haja contribuição dum novo arranjo estrutural, aliás de natureza instável.

Seja como for, porém, pràticamente o que se verifica é o pequeno ganho de resistência inicial obtido pelo tratamento térmico destas pozolanas, que não são portanto de alta reactividade inicial, em comparação com a enorme subida das tensões de rotura iniciais obtidas com a de Santo Antão.

Veremos, no capítulo que se vai seguir, onde se estudam as principais propriedades da pozolana natural reactivada, que a vantagem do tratamento térmico daquelas pozolanas reside na reactividade a longo prazo (a 3 meses e a 1 ano), que é substancialmente aumentada.

(Continua)

SUMMARY

This paper describes a method for improving the reactivity of certain natural pozzolanas by means of adequate thermal treatment.

The first chapter concerns the way in which to carry out reactivation and contains the explanation of the phenomenon.

The second chapter gives the results of the determinations of the properties of natural reactivated pozzolana: influence on the rupture stresses of concrete, permeability coefficient, hydration heat and resistance to chemical attacks.

The most important reactivation is obtained with a kind of very altered trachytic tuff, like the natural pozzolana of Santo Antão island (Cabo Verde), and it consists in extracting the water adsorbed by the pozzolana grains. This is achieved by heating at 350°C and subsequent cooling out of contact with atmospheric humidity, e.g. closed container, or in the quickest possible manner to prevent readsorption of the water-vapour molecules of the atmosphere. The treated pozzolana should be kept in vapourtight containers like the ones currently used for storing hydraulic binders.

The reactivation of other natural pozzolanas is also considered, as for instance that of Pedras Pretas (Porto Santo island, Madeira) and of Pedregal (S. Miguel island, Azores). But the efficiency of the reactivation of these pozzolanas, made at much higher temperatures, 600° to 700°C, is rather small and is not caused by the outcome of adsorbed water. It is chiefly due to the conversion into pozzolana of the clay contained in them.

By the reactivation of Santo Antão's natural pozzolana it is possible to obtain a high initial reactivity pozzolana, i. e. one which, when replacing part of the cement in concrete, confers it rupture stresses at 28 days higher than those it possesses when straight portland cement is used.

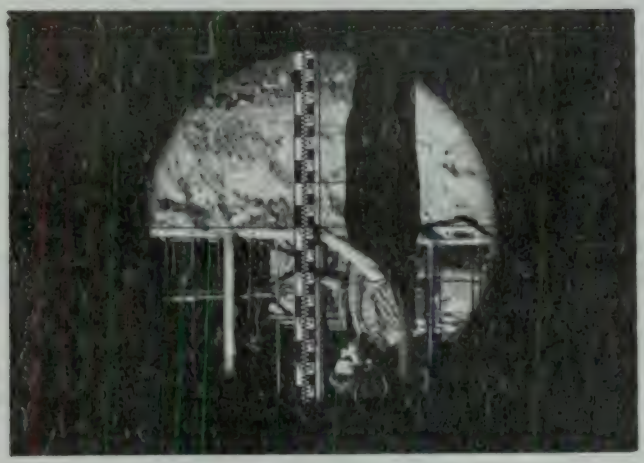
With the reactivation of the other natural pozzolanas (Pedras Pretas and Pedregal) it is only possible to increase long term reactivity: after one year, the recovery of the rupture stresses of concrete in which part of cement has been replaced by reactivated pozzolana is fairly greater than in case of non reactivated pozzolana.

The permeability coeficient of concrete is substantially reduced by Santo Antão's reactivated natural pozzolana.

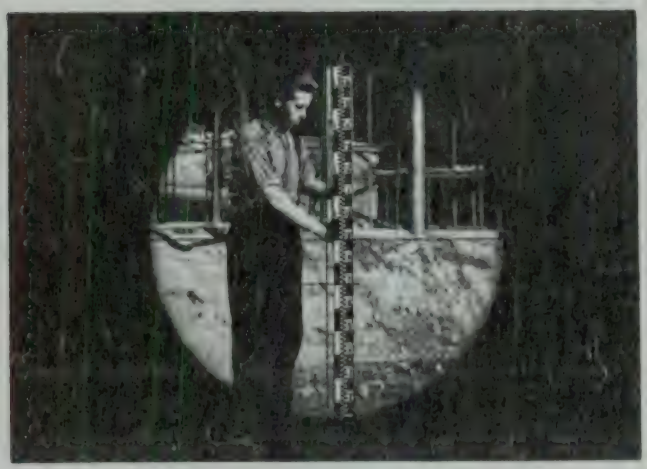
Hydration heat and resistance to the action of sulphates remain practically the same or are slightly improved by the reactivation of natural pozzolana.

The use of Santo Antão's reactivated natural pozzolana makes it possible to obtain all purpose pozzolanic cement of better quality than portland cement.

ANTIGAMENTE :



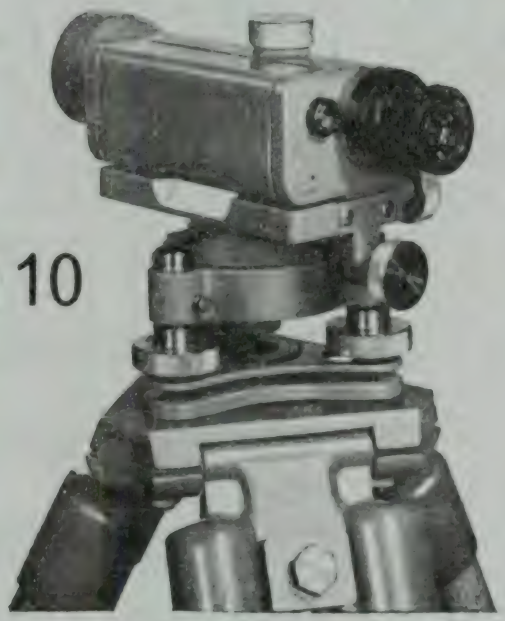
HOJE :



Com
imagem
direita
na luneta

WILD
HEERBRUGG

N 10



Trabalho cómodo e simples sem erros e sem dúvidas, sinais correctos, não invertidos, claros e rápidos.

O pequeno nível WILD N 10 com a designação «E» tem imagem direita do campo de observação na luneta. A mesma tem luminosidade igual ao modelo convencional e o mesmo tamanho.

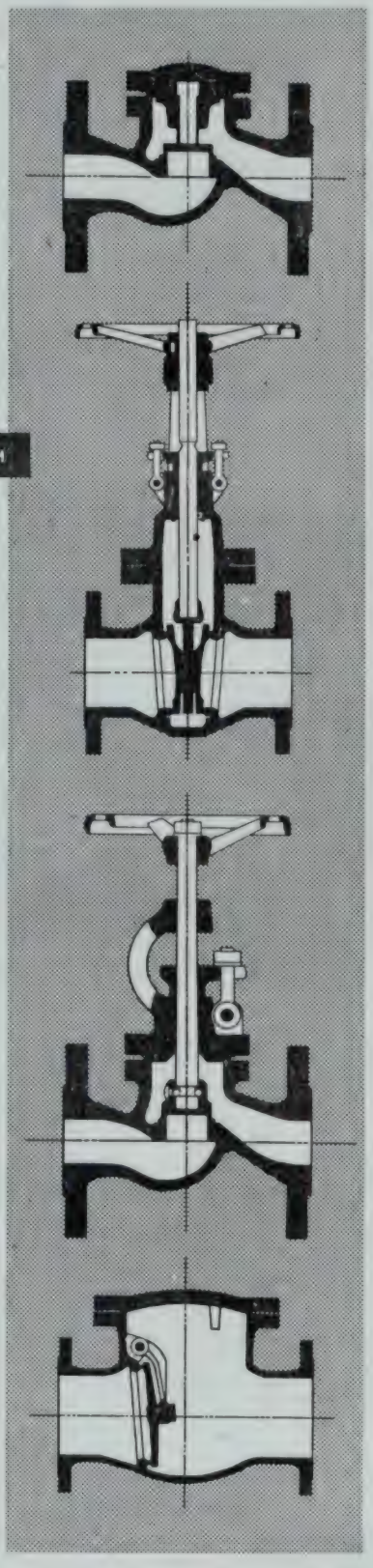
Representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA-2 — TELEFONE 68 11 27

válvulas

- passagem
- retenção
- regulação
- cunha



PARA LÍQUIDOS, VAPORES E GASES (INCLUINDO NH_3 E SO_2) EM

ferro fundido
ferro fundido com grafite esferoidal
aço vasado
aço inoxidável

DN 10 mm até 600 mm **PN 6 a 40 kg/cm²**

conforme as normas **DIN** e **ASA**

VÁLVULAS DE SEGURANÇA, DE REDUÇÃO, ELECTROMAGNÉTICAS E VÁLVULAS ESPECIAIS

- estudos
- projectos
- orçamentos
- assistência técnica

FENAL

SOCIEDADE PORTUGUESA DE VÁLVULAS, LDA.

SEDE: Rua Academia das Ciências, 5 — Telef. 34331/5 — Lisboa
FILIAL: Praça D. João I, 5, 2.º — Telef. 24771 — Porto

C. D. U. 628.394

DISTRIBUIÇÃO DA CONTAMINAÇÃO NO ESTUÁRIO DO TEJO *

POR PEDRO CELESTINO DA COSTA
Engenheiro Civil (I. S. T.)

SUMÁRIO

O coeficiente de difusão longitudinal no estuário do Tejo é determinado a partir do gradiante de salinidade médio obtido experimentalmente. Coeficientes de difusão transversal são determinados a partir de valores de concentração bacteriana em secções transversais do estuário. Utilizando o método de Stommel deduz-se a distribuição longitudinal média da contaminação devida aos esgotos de Lisboa e com a ajuda dos coeficientes de difusão transversal deduzem-se a distribuição em superfície nas condições actuais e futuras, a devida a novas condições de lançamento e o grau de tratamento necessário.

O estudo (1) da poluição do estuário do Tejo levado a efeito em 1940 mostrou que os índices médios da poluição do estuário (oxigénio dissolvido, carência bioquímica, colimetria) eram francamente baixos.

Em 1952/53 efectuaram-se estudos (2) para delimitar, com base em análises bacteriológicas das águas em secções transversais do estuário, zonas de mais intensa contaminação que se verificou serem as da margem direita. Nestas os valores da concentração bacteriana são muito superiores aos valores médios do estuário e ultrapassam francamente os limites julgados admissíveis para zonas desportivas e balneares como são nomeadamente as dos troços de juzante do estuário.

No presente estudo aplica-se a teoria da difusão estabelecida por Stommel (3) utilizando-se determinações de salinidade para cálculo do coeficiente de difusão longitudinal e avaliam-se coeficientes de difusão transversal com base em determinações de concentração bacteriana em secções transversais do estuário. É, assim, possível determinar teòricamente áreas de distribuição da contaminação para condições actuais e futuras.

A complexidade e dificuldade do problema, a necessidade de se admitirem várias hipóteses simplificadoras e o número relativamente restrito de dados experimentais disponíveis não permitem grau de rigor que não seja o de uma simples ordem de grandeza.

1 — TEORIA DA DIFUSÃO

Nos últimos anos o problema da poluição dos estuários tem vindo a sofrer avanços consideráveis e teorias como as da mistura em todo o prisma de marés ou as da mistura em troços do estuário (Ketchum) são substituídas por novas concepções, teòricamente mais rigorosas, ainda que de dificuldades práticas bastante maiores. Estudos recentes baseiam-se na determinação experimental de coeficientes de difusão e na concepção elementar de que a entrada de água doce deve, em cada secção, ser compensada pela equivalente entrada de água salgada, de modo a manter-se a salinidade média na secção. É possível exprimir teòricamente (4) a variação da concentração de um elemento poluidor, em relação a três dimensões — comprimento (x), largura (y) e profundidade do estuário (z) — da seguinte forma:

* Extraído do estudo: «Comprovação de previsões e esclarecimentos de actualização ao ante-projecto de Saneamento da cidade de Lisboa», Pedro Celestino da Costa, Junho de 1963 (não publicado).

$$\frac{dc}{dt} = u\frac{dc}{dx} + v\frac{dc}{dy} + w\frac{dc}{dz} - \frac{d}{dx}\left(k_x\frac{dc}{dx}\right) - \frac{d}{dy}\left(k_y\frac{dc}{dy}\right) \quad \frac{d}{dz}\left(k_z\frac{dc}{dz}\right)$$

Os três primeiros membros do segundo termo da equação exprimem a passagem da poluição (de concentração c) no sentido do escoamento final, de montante para juzante («advection») e os três membros restantes são os componentes da difusão salina por turbulência («eddy diffusivity»).

u, v, w — são os componentes da velocidade média na secção

k_x k_y k_z — são os chamados coeficientes de difusão e exprimem-se em m2/seg.

Não há solução prática para esta equação tri-dimensional — ver, no entanto, o estudo de Diachishin (5) — e, assim, há geralmente que fazer simplificações e prescindir da distribuição segundo y e z. Mas o que torna o problema ainda muito complicado é que os coeficientes de difusão não são conhecidos à priori e são muito dispares os valores que se determinam em vários estuários. Assim há, antes de mais, de proceder a essa determinação por meios experimentais (geralmente a partir da determinação de salinidades ou fazendo o lançamento de corantes). É possível que a análise efectuada por Bowden (6) contribua para uma possível simplificação do problema, na medida em que se consigam destrinçar os vários efeitos expressos pelo coeficiente k, tornando talvez viável o conhecimento á priori dos vários coeficientes de difusão até agora compreendidos num único.

2 — DIFUSÃO LONGITUDINAL

O estuário do Tejo, desde a secção «A» até à foz, apresenta secção transversal variando entre 40 000 e 60 000 m² e pode-se assim, numa primeira aproximação, assimilá-lo a um estuário de secção constante da ordem dos 50 000 m². Sendo assim aplicamos a análise que Stommel desenvolveu para este caso, incluída no seu inovador trabalho (3). Na realidade, é este trabalho de Stommel que está na base de todos os restantes estudos que tem vindo a desenvolver-se com base no conceito de coeficiente de difusão por ele concebido pela primeira vez. Sabe-se hoje que a concepção de Stommel é válida mesmo para estuários em que se não realiza o misturamento vertical (6), mas os valores que se obtêm são apenas valores médios, isto é, os que se obtêm, em média, no decorrer do ciclo de maré.

Determinamos primeiramente o valor da concentração da poluição em relação ao caudal de água doce do rio: $c_0 = \frac{\Psi}{Q}$ e em seguida o valor de $Z = \frac{4\,A\,S^2}{\pi\,.\,Q^2}$, em que:

A = coeficiente de difusão horizontal (segundo o eixo dos x) em m2/seg.

S = área da secção transversal, admitida constante (em m2).

Q = o caudal de água doce do rio, em m3/seg.

π = tempo, em segundos, de decréscimo da concentração inicial (c_0) da poluição (Ψ) até cerca de metade do tempo total que a poluição leva a desaparecer (ou a ficar em 10 % da concentração inicial).

Destes valores, apenas A não é conhecido à priori. Uma maneira de o determinar é com base nos valores das salinidades médias e gradiante de salinidade no estuário. Tem-se:

$$A = \frac{Q\,(f-1)}{S\,\frac{df}{dx}}$$

em que f é a concentração de água doce.

Pode também fazer-se:

$$A = \frac{Q\,.\,S}{S\,\frac{ds}{dx}}$$

em que s é a salinidade.

Com base nos valores da salinidade média das estações extremas dos «Estudo do Anteprojecto» (1) ou seja as estações «I» e «F» tem-se um gradiante de salinidade (grs. por 1000 grs.) de:

$$\frac{35{,}23 - 34{,}06}{16{,}4\ \text{km}} = 0{,}0715/\text{km} = 0{,}0000715/\text{m}.$$

Aplicando este valor nas secções correspondentes às estações «I», «A» e «L» obtém-se, para coeficiente de difusão, valores da ordem de 5×10^6 cm²/seg.

$$A = \frac{60 \times 34{,}85}{55\,000 \times 0{,}0000715} = 530 \text{ m2 s} =$$
$$= 5{,}3 \times 10^6 \text{ cm2/seg.}$$

Bowden (6) refere valores do coeficiente k_x, segundo várias observações em rios de Inglaterra, variando de $5{,}3 \times 10^5$ cm2/s a $53{,}5 \times 10^5$ cm2/s ($= 5{,}35 \times 10^6$ cm2/s).

Vamos considerar, em primeira aproximação, o valor de:

$$k_x = A = 500 \text{ m2/seg.}$$

A relação entre a concentração da poluição na secção do estuário em que se faz o lançamento do esgoto (seja a secção arbitràriamente designada por *L*) e a concentração c_0, já referida, é:

$$\frac{c\,(L)}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{1+Z}} \left(1 - e^{L'\sqrt{1+Z}}\right)$$

O termo $e^{L'\sqrt{1+Z}}$ pode desprezar-se, no nosso caso, por conduzir a valores muito pequenos.

Consideramos, em acordo com Stommel, o estuário transposto para uma escalada arbitrária em que o comprimento do estuário corresponde a distância (L') relacionada com a distância real (L) pela fórmula:

$$L' = \frac{Q}{AS} L$$

Em acordo com o desenho junto, consideramos o comprimento do estuário até sensìvelmente à secção «D» ou seja cerca de 34 kms. Nestas condições a saída do Caneiro situa-se à distância $x' = -0{,}03$, o Terreiro do Paço à distância $x' = -0{,}0396$ e a futura saída (*) à distância $x' = -0{,}0624$ (secção «1» do estuário).

Vejamos, em primeiro lugar, as condições de oxigenação das águas na secção «1» do estuário, para as condições de lançamento de esgotos em 1980, e considerando um caudal de rio de 60 m3/seg.

Seja, então, uma carga poluidora de B. O. D., de:

$$80 \text{ grs/hab/dia} \times 1\,200\,000 = 96 \times 10^6 \text{ grs/dia} =$$
$$= 1110 \text{ grs/seg.}$$

A concentração inicial ou básica é:

$$c_0 = \frac{1110}{60} = 18{,}6 \text{ grs/m3}$$

Admitindo um período de 8 dias para o decréscimo do B. O. D.:

$$\pi = \frac{8/2 \times 86\,400}{0{,}693} = 5 \times 10^5 \text{ seg.}$$

O valor de Z é então:

$$Z = \frac{4 \times 500 \times 50\,000^2}{5 \times 10^5 \times 60^2} = 2771$$

Então:

$$\frac{c\,(L)}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{1+Z}} = \frac{1}{\sqrt{2771}} = 0{,}019$$

E a concentração na secção «1» do estuário será então:

$$c\,(L) = 0{,}019 \times 18{,}6 \text{ grs/m3} = 0{,}35 \text{ grs/m3} =$$
$$= 0{,}35 \text{ mgl/l.}$$

que é um valor diminuto, muito abaixo (cerca de 10 vezes) do que se poderia possìvelmente tolerar e que deve cobrir amplamente os erros devidos a não se ter contado com desigual mistura em toda a secção do estuário e não se ter atendido à variação real da secção transversal do estuário.

O panorama é completamente diferente no que se refere à concentração bacteriológica. Os valores unitários que parece razoável considerar, em acordo com Imhoff-Fair (7): 400 biliões de bactérias coli por habitante, são bastante superiores aos que dão os resultados constantes das análises dos «Estudos de Ante-projecto» que estão afectados do modo como as análises bacteriológicas foram feitas (esgoto decantado e fil-

* Em acordo com o previsto no «Ante-projecto de saneamento da cidade de Lisboa — 1955».

trado). Na realidade, a um valor de título colibacilar de 10^{-6} corresponde (para uma capitação de 125 l/dia) um valor de apenas 125 biliões, sendo de notar que se obtiveram, naquelas análises, valores sensìvelmente mais baixos, várias vezes. Para 400 biliões e capitação futura de 200 litros/hab/dia, a concentração no esgoto seria:

$$\frac{400\,000\,000\,000}{200\,000} = 2\,000\,000 \text{ por c. c.}$$

possìvelmente demasiado elevada. Consideramos um valor correspondente a 1 500 000 Bact/c. c., ou seja uma capitação de bactérias de: 300 biliões, compreendido entre os 125 (Inverno) e 400 (Verão) de que falam Imhoff-Fair.

A carga de bactérias coli será então, por segundo:

$$\frac{1\,200\,000 \text{ habitantes} \times 300 \times 10^9}{86\,400} =$$
$$= 4{,}16 \times 10^{12} \text{ Bact. seg.}$$

A concentração em relação ao caudal do rio é:

$$c_0 = \frac{4{,}16 \times 10^{12}}{60} = 6{,}95 \times 10^{10} \text{ Bact./m3}$$

Admitindo um período de vida de 2 dias para, à temperatura de cerca de 20 graus, as bactérias se reduzirem de 90 % do valor inicial (8), tem-se:

$$\pi = \frac{2/2 \times 86\,400}{0{,}693} = 1{,}25 \times 10^5 \text{ seg.}$$

Tem-se:

$$Z = \frac{4 \times 500 \times 50\,000^2}{1{,}25 \times 10^5 \times 60^2} = 11.100$$

$$\frac{c\,(L)}{c_0} \simeq \frac{1}{\sqrt{11.100}} = 0{,}0095$$

É a concentração na secção do estuário onde se faça o lançamento (desde que se despreza o segundo termo já referido o valor é o mesmo em qualquer secção do lançamento) é:

$$c\,(L) = 0{,}0095 \times 6{,}95 \times 10^{10} \text{ Bact m3}$$
$$= 6{,}6 \times 10^8 \text{ Bact/m3}$$
$$= 66\,000 \text{ Bact/100 c. c.}$$

É um valor elevadíssimo, como aliás era de esperar, visto tratar-se da desembocadura dos esgotos e na região desta as concentrações são sempre muito elevadas. Deve ainda atender-se a que se trata de um valor médio correspondente a toda a secção «1» e, na realidade, isso não se dará dada a localização da desembocadura que se prevê muito mais próxima da margem direita, além de que a difusão transversal é acentuadamente da margem esquerda para a margem direita, o que parece ser principalmente devido ao efeito de Coriólius.

Se tivermos em atenção valores obtidos em 1952/3 (2) podemos notar que valores superiores àquele de 66 000 Bac/100 c. c. são poucos: enseada do Terreiro do Paço (1 100 000 e 110 000), desembocadura de Algés (110 000) e próximo a Belém (110 000).

É certamente de tentar conseguir, por via teórica, a obtenção de resultados comparáveis aos obtidos experimentalmente em 1952 3.

Em 1952 a população devia ser de cerca de 787 000 habitantes. Para 1980 considera-se a população de 1 200 000 habitantes. A fórmula da concentração inicial pode escrever-se em função do número de habitantes:

$$c_0 = \frac{300 \times 10^9}{86\,400 \times 60} \times P = 57\,870 \times P \text{ Bact/m3} =$$
$$= 5{,}787 \times P \text{ Bact/100 c. c.}$$

e

$$c\,(L) = 0{,}0095 \times 5{,}787 \times P = 0{,}055 \times P$$
$$\text{Bact/100 c. c.}$$

Para 1980 tem-se: $c\,(L) = 0{,}055 \times 1\,200\,000 =$
$= 66\,000$ Bact/100 c. c.

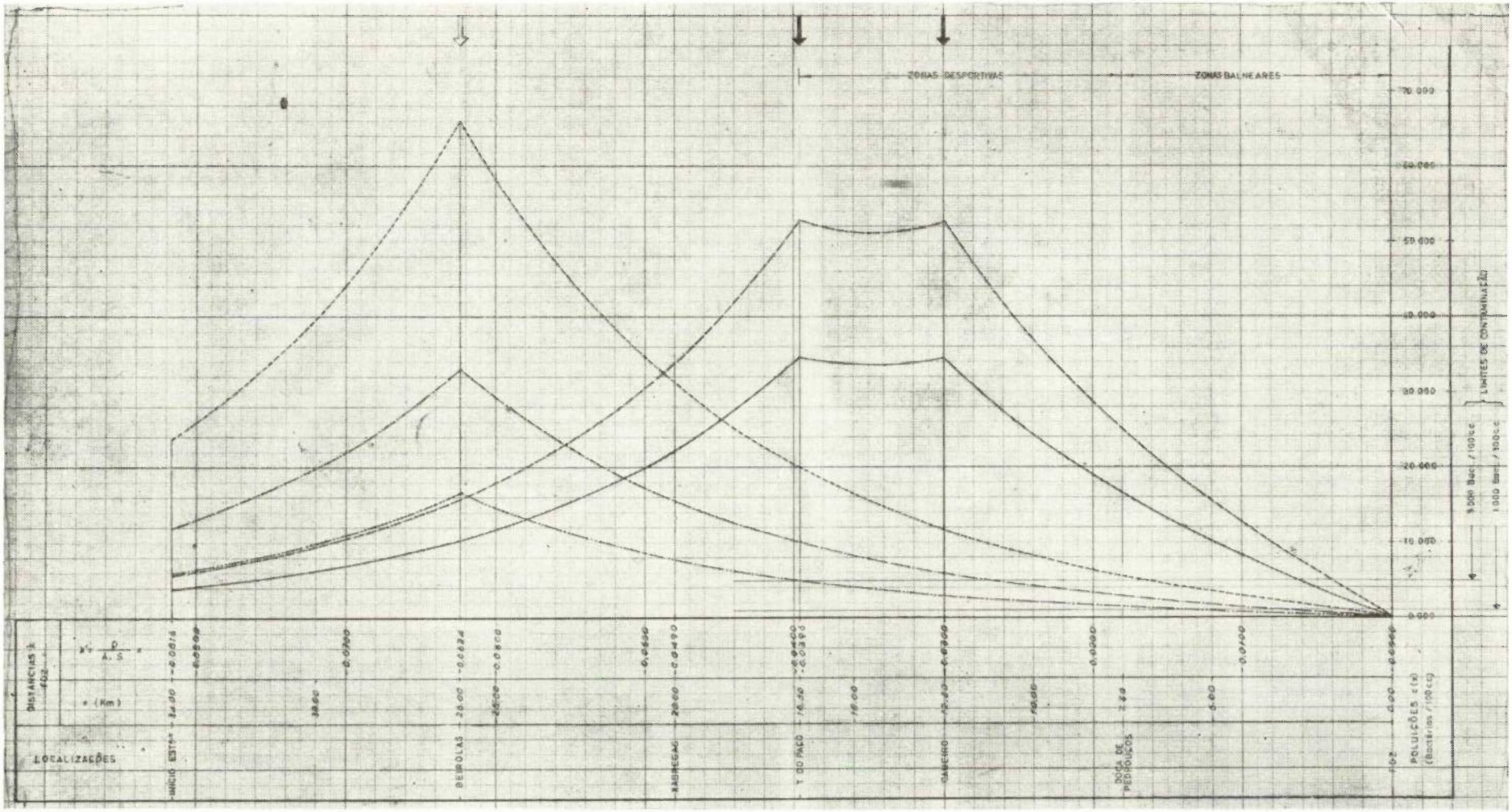
Para 1952 tem-se: $c\,(L) = 0{,}055 \times 787\,000 =$
$= 43\,280$ Bact/100 c. c.

Estes valores (médias nas secções transversais) são os máximos no local de lançamento.

A sua distribuição ao longo do estuário determina-se, em acordo com Stommel, pelas fórmulas:

a montante do lançamento: $\dfrac{c_1\,(x)}{c\,(L)} = e^{k1(x' - L')}$

a juzante do lançamento: $\dfrac{c_2\,(x)}{c\,(L)} = \dfrac{e^{k2x'} - e^{k1x'}}{e^{k2L'} - e^{k1L'}}$



LEGENDA

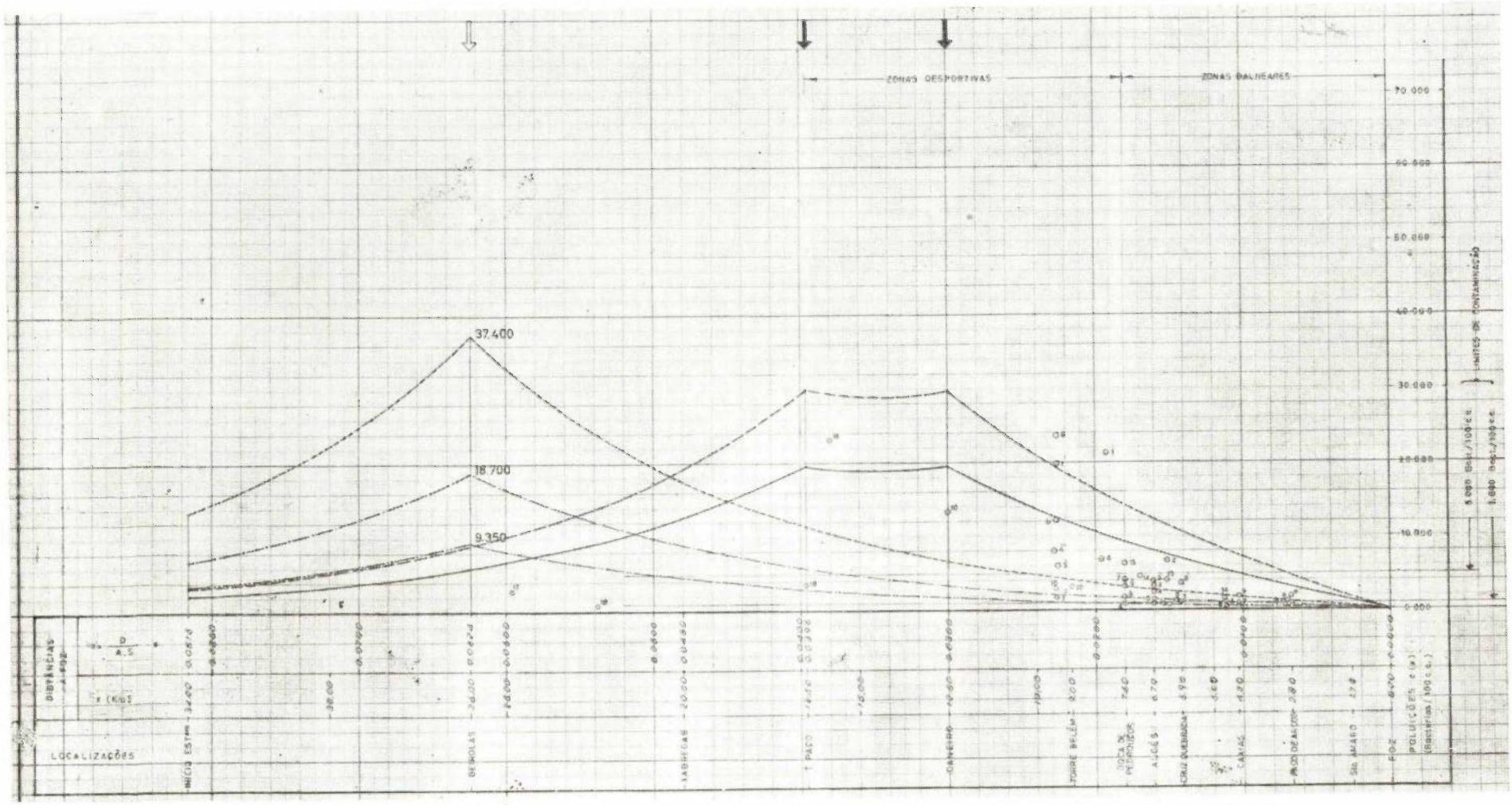
- ——— Lançamento no Terreiro do Paço e no Caneiro de Alcantara em 1952
- - - - - Idem em 1980
- ------ Lançamento em Beirolas em 1980 com 0% de tratamento
- —·—·— Idem com 50% de tratamento
- —··—··— Idem com 75% de tratamento
- ↓ ↓ Local de lançamento simultâneo
- ⇩ Local único de lançamento futuro

CONTAMINAÇÃO LONGITUDINAL NO ESTUÁRIO DO TEJO

PERÍODO DE REDUÇÃO: 2 DIAS

escalas
- ABCISSAS: 12 cm ◇ 1Km
- ORDENADAS: 5 m/m ◇ 2.000 Bact. / 100 c.c.

DESENHO N.º 2



LEGENDA

- Lançamento no Terreiro do Paço e no Caneiro de Alcantara em 1952
- Idem em 1980
- Lançamento em Beirolas em 1980 com 0% de tratamento
- Idem com 50% de tratamento
- Idem com 75 % de tratamento
- Ensaio nº11 efectuado em 1952
- Local de lançamento simultâneo
- Local único de lançamento futuro

CONTAMINAÇÃO LONGITUDINAL NO ESTUÁRIO DO TEJO

PERÍODO DE REDUÇÃO : 0.5 DIAS

escalas
- ABCISSAS: 12 cm ◇ 1Km
- ORDENADAS: 5 m/m ◇ 2.000 Bact. / 100 c.c.

em que:

$$k_1 = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1+Z}\right) = +53$$

$$k_2 = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{1+Z}\right) = -52$$

Procedendo deste modo obtiveram-se as linhas de distribuição longitudinal da contaminação ao longo do estuário, conforme o desenho n.º 1 junto, correspondente às condições:

a) lançamento em 1952 e em 1980 no Terreiro do Paço e Caneiro (sensìvelmente condições da rede de esgoto actual)

b) lançamento em 1980, em Beirolas, na secção «1» para graus de tratamento de 0 %, 50 % e 75 %

Deve notar-se que num estuário com as dimensões do Tejo e para as cargas poluidoras consideradas é natural que as fórmulas de Stommel adotadas (caso particular de secção constante e coeficiente de difusão constante) dêem valores exagerados especialmente nas regiões mais afastadas do lançamento. Isto é devido ao facto de Stommel ter admitido a hipótese de que a poluição só se anula totalmente na foz do estuário, quando, nas condições do nosso caso, isso não corresponde completamente à realidade, dados os grandes volumes disponíveis para a diluição e as grandes distâncias reais (dezenas de quilómetros). Efectivamente haveria que ter em conta uma correcção, considerando o ponto de anulação bastante antes da foz. Isso não se faz, no entanto, por agora. Preferimos antes proceder, no desenho n.º 2 junto, à marcação dos valores experimentais obtidos em 1952/53 com análises bacteriológicas médias, em secções transversais do estuário,* e à pesquisa de uma curva que seguindo as leis de Stommel, corresponda melhor aos resultados experimentais.

Deve notar-se que basta considerar para o período de descrécimo de bactérias o de 0,5 dia, em vez de 2 dias, para se ter a curva do desenho n.º 2 que se adapta bastante melhor à ordem de grandeza dos valores dos resultados experimentais. Efectivamente Tibby (9) refere períodos de 4 a 7 horas apenas para o decréscimo a 90 % da concentração de bactérias, em águas oceânicas no sul da Califórnia, valores francamente inferiores aos referidos por Orlob (8). Nos «Estudos de Ante-projecto» referem-se os ensaios laboratoriais de decréscimo de bactérias, com água do Tejo, que estão mais próximos da ordem de grandeza dos 2 dias.

Traçamos, no desenho n.º 2, linhas de distribuição da contaminação média ao longo do estuário, correspondentes às seguintes condições:

a) Lançamento, em 1952, no Terreiro do Paço e Caneiro de Alcântara, de esgotos admitindo o período de redução de 0,5 dia.

b) Lançamento em 1980, nos mesmos locais e com o mesmo período de redução.

c) Lançamento, em 1980, em Beirolas (secção «1») de esgotos com os graus de tratamento de 0 %, 50 % e 75 % (período de redução: 0,5 dia).

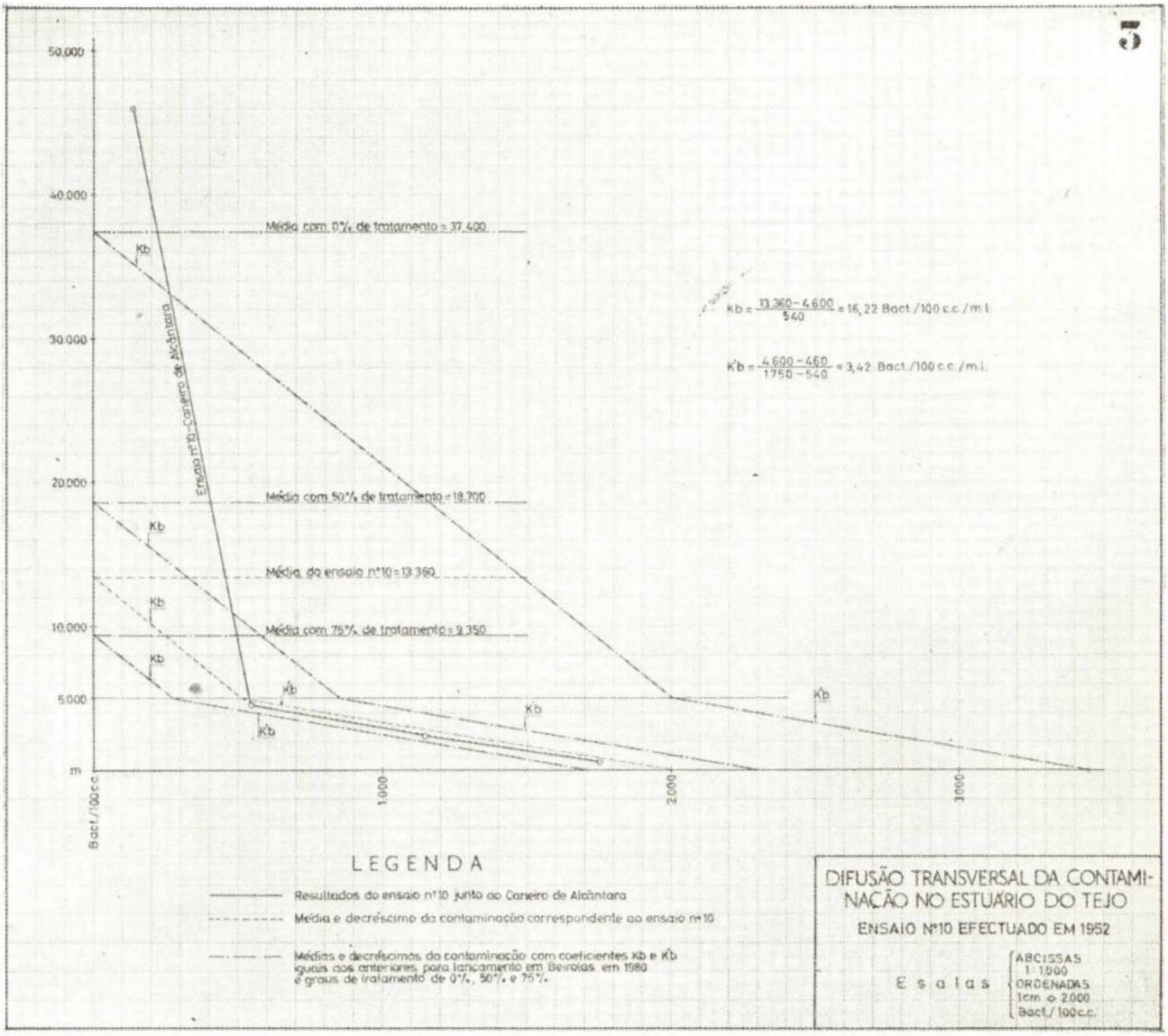
A distribuição dos esgotos da rede actual concentrada nas desembocaduras do Terreiro do Paço e Caneiro é uma simplificação, justificada pelo facto de cerca de 3/4 dos esgotos totais da cidade sairem efectivamente por essas desembocaduras.

O desenho n.º 2 mostra como a simples deslocação para o perfil «1» (Beirolas) da desembocadura final permite reduzir consideràvelmente os índices de concentração nas regiões desportiva e balnear e os decréscimos substancias previsíveis com graus de depuração de 50 % e 75 %. O denho n.º 2 mostra ainda o agravamento considerável (em intensidade e alargamento da zona de contaminação) que se pode prever para 1980, mantendo as actuais condições da rede do esgoto da cidade.

2 — DIFUSÃO TRANSVERSAL

Pelos dados deduzidos da teoria de Stommel e autores posteriores não nos é possível prever a distribuição transversal da poluição. Uma solução já adoptada (4) é a de admitir $k_x = k_y$ o que, no entanto, não parece condizer com outras observações em que se verifica não ser constante a difusividade horizontal que, segundo outras investigações, parece aumentar com a escala dos fenómenos em observação ou, ainda, aumentar em proporção directa à distância ao centro de

* Valores médios numa secção mas a diversas horas do dia. Não são valores de médias diárias como as correspondentes às curvas de contaminação longitudinal apresentadas.



dispersão. Nos ensaios de determinação da concentração bacteriana em secções transversais do estuário (2), em 1952, parece ressaltar um decréscimo muito rápido dessa concentração desde valores da ordem das 50 000 Bact./100 c. c. a 5000 Bact./100 c. c., tornando-se muito mais lento o decréscimo desde este último valor até valores próximos das centenas de bactérias por 100 c. c. Em relação à escala das variações observadas não parece demasiado incorrecto proceder do seguinte modo: no desenho n.º 3 junto apresentam-se os valores obtidos em secção representativa (ensaio n.º 10 — Caneiro). Indicam-se os índices obtidos em vários pontos da secção transversal e a respectiva média aritmética. Determina-se, a partir deste valor médio na secção, um coeficiente de difusão transversal, k_b, de decréscimo do número de bactérias por metro de largura do estuário, na região em que os índices atingem valores iguais ou superiores a 5000 Bact./100 c. c. e um coeficiente k'_b desde 5000 a zero. Para o caso do desenho n.º 3 os valores desses coeficientes são

$$k_b = 16{,}22 \text{ Bac./100 c. c./m.}$$

$$k'_b = 4{,}32 \text{ Bac./100 c. c./m.}$$

Admitindo a validade destes coeficientes para outras secções do estuário, é fácil determinar, em qualquer caso, as distâncias, dentro do perfil transversal, em que o índice de batérias se en-